INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Abril 2019 • N.º 511 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Plantas matemáticas

Algunos vegetales exhiben geometrías sorprendentes. ¿Cómo las construyen?

NEUROCIENCIA

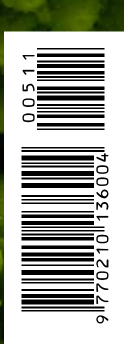
Mecanismos neuronales del reconocimiento facial

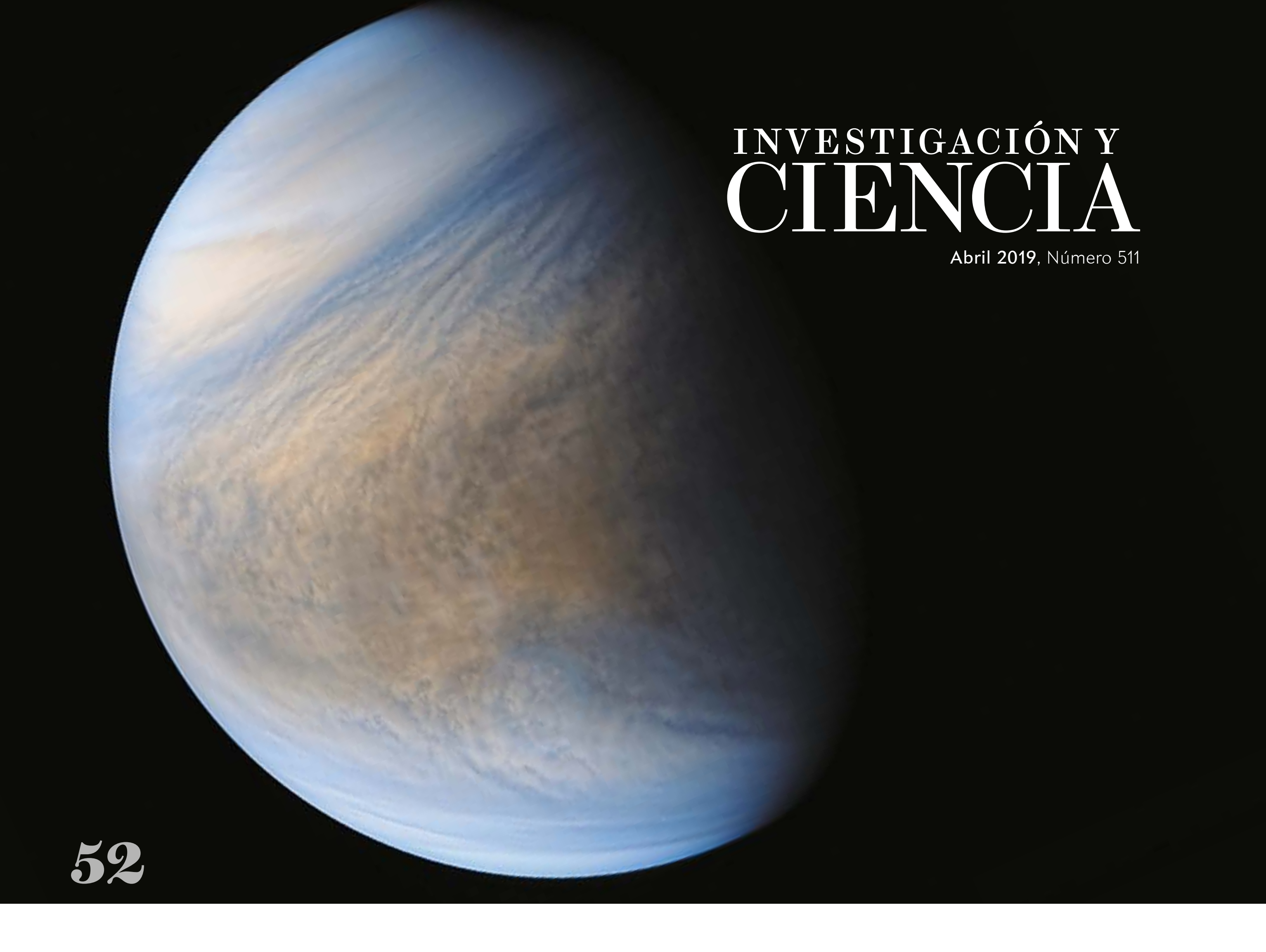
CRONOMEDICINA

Beneficios de adaptar los tratamientos a los ritmos biológicos

ASTRONOMÍA

Lo que Venus puede enseñarnos sobre los exoplanetas

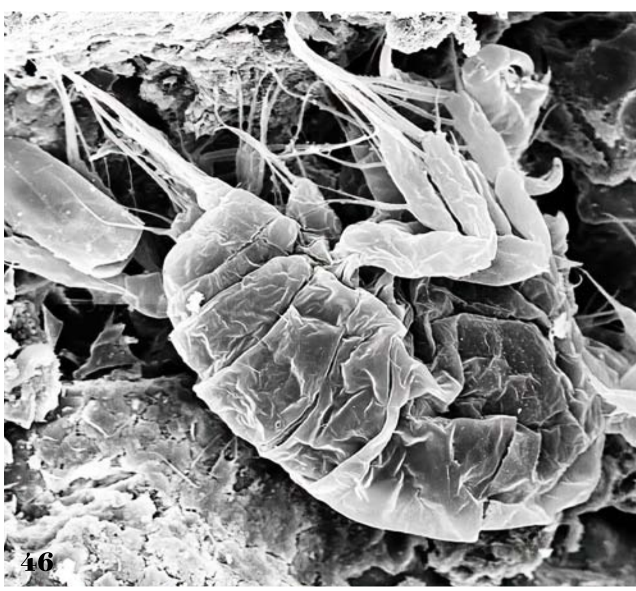




ARTÍCULOS

JAXA, ISAS, DARTS Y DAMIA BOUIC


6


46


78

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

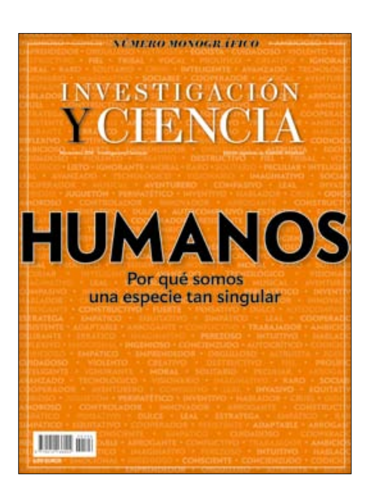
SECCIONES

EN PORTADA



Las plantas generan asombrosas formas geométricas. ¿Cómo lo hacen? Aunque existen modelos matemáticos que describen las proporciones áureas y los números de Fibonacci observados en numerosas especies vegetales, su origen molecular no ha comenzado a investigarse hasta hace poco. Varios estudios recientes sugieren que la filotaxis podría ser un fenómeno menos determinista de lo que se pensaba. Fotografía © sergeyskleznev/iStock/Getty Images.

redaccion@investigacionyciencia.es



Noviembre 2018

CONSCIENCIA Y YO

En «El problema más difícil» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2018], Susan Blackmore considera el debate sobre la naturaleza de la consciencia humana y la manera en que esta podría diferir de lo que experimentan otros animales.

Resulta difícil no antropomorfizar un comportamiento animal cuando observamos lo que parece ser una actividad creativa en algunas especies de primates no humanos y quizás en otros animales. Tal vez merezca la pena postular que la creatividad podría ser una marca de la consciencia, pues todo animal que exhiba un comportamiento creativo deberá poseer una capacidad de autorreflexión, así como la de interpretar el entorno y el papel que desempeña en él.

Robert Rodgers
Profesor emérito de farmacia, Universidad de Rhode Island

Blackmore sostiene que los animales carecen del «yo» consciente que poseemos los humanos. Si es así, ¿cómo explicar la capacidad de planificar que exhiben algunos de ellos, como las ardillas que guardan nueces para el invierno o los perros que entierran huesos? Ambos comportamientos parecen exigir el sentimiento de un «yo» persistente que, en el futuro, seguirá estando ahí y tendrá hambre.

John Orlando

Responde Blackmore: *Sobre la pregunta de Rodgers, que la creatividad pudiera constituir un indicador de actividad consciente parece obvio cuando pensamos en cuervos que fabrican herramientas o en orangutanes artistas. Sin embargo, ¿qué decir de los pájaros ptilonorrínquidos que, de manera instintiva, decoran construcciones muy elaboradas? ¿Y de los algoritmos de aprendizaje profundo que escriben artículos? Ahí la noción de que la creatividad exige una facultad de autorreflexión falla: es seguro que los algoritmos no se entregan a ella.*

Orlando sostiene que las ardillas necesitan «el sentimiento de un "yo" persistente» para almacenar nueces. Aunque esto puede ser cierto en el caso de una persona que guarda alimentos en la nevera, la capacidad de las ardillas para esconder nueces es heredada, y el animal no necesita saber por qué hace lo que hace.

Todos nos dejamos engañar con facilidad por intuiciones tan poderosas como falsas sobre nuestro yo. El yo es una de las muchas construcciones del cerebro, no su controlador.

INTELIGENCIA SOLITARIA

En «Solos en la Vía Láctea» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2018], John Gribbin argumenta de manera brillante a favor de la posibilidad de que los seres humanos seamos la única forma de vida inteligente de toda la galaxia. No obstante, los mismos procesos que en su día permitieron que la vida acabara emergiendo en nuestro planeta siguen produciéndose hoy. Dado que nuestra galaxia continúa evolucionando, cabe esperar que las probabilidades de que dicha situación se repita aumentarán en el futuro.

Greg Konesky
Hampton Bays, Nueva York

Las suposiciones de Gribbin son ridículas. Nuestra galaxia tiene un diámetro de unos 100.000 años luz. Las primeras señales de radio de la humanidad se emitieron hace unos 120 años, por lo que la respuesta de una civilización que viviese a tan solo 65 años luz aún estaría viajando hacia nosotros. Además, ¿cuán lejos podrían llegar nuestras señales antes de tornarse demasiado débiles y dispersas para que nadie pudiera reconocerlas?

Art Cassel
Riverside, California

En la infografía «Cadena de coincidencias» que acompaña al artículo de Gribbin falta un eslabón: en el momento de la gran explosión que dio origen a nuestro universo, surgieron también todas las leyes de la naturaleza. Algunas teorías proponen la existencia de una cantidad exorbitante de otros universos. De ser así, un aspecto reseñable es que nuestro universo tuviese ya desde el principio todas las propiedades correctas para permitir la cadena de eventos posteriores.

Michael Tyler
Rochester, Michigan

Responde Gribbin: *Konesky tiene razón cuando afirma que los humanos podríamos ser la primera civilización tecnificada de la galaxia, pero no la única. En tal caso la pregunta es: ¿seguiremos estando aquí cuando surjan las otras?*

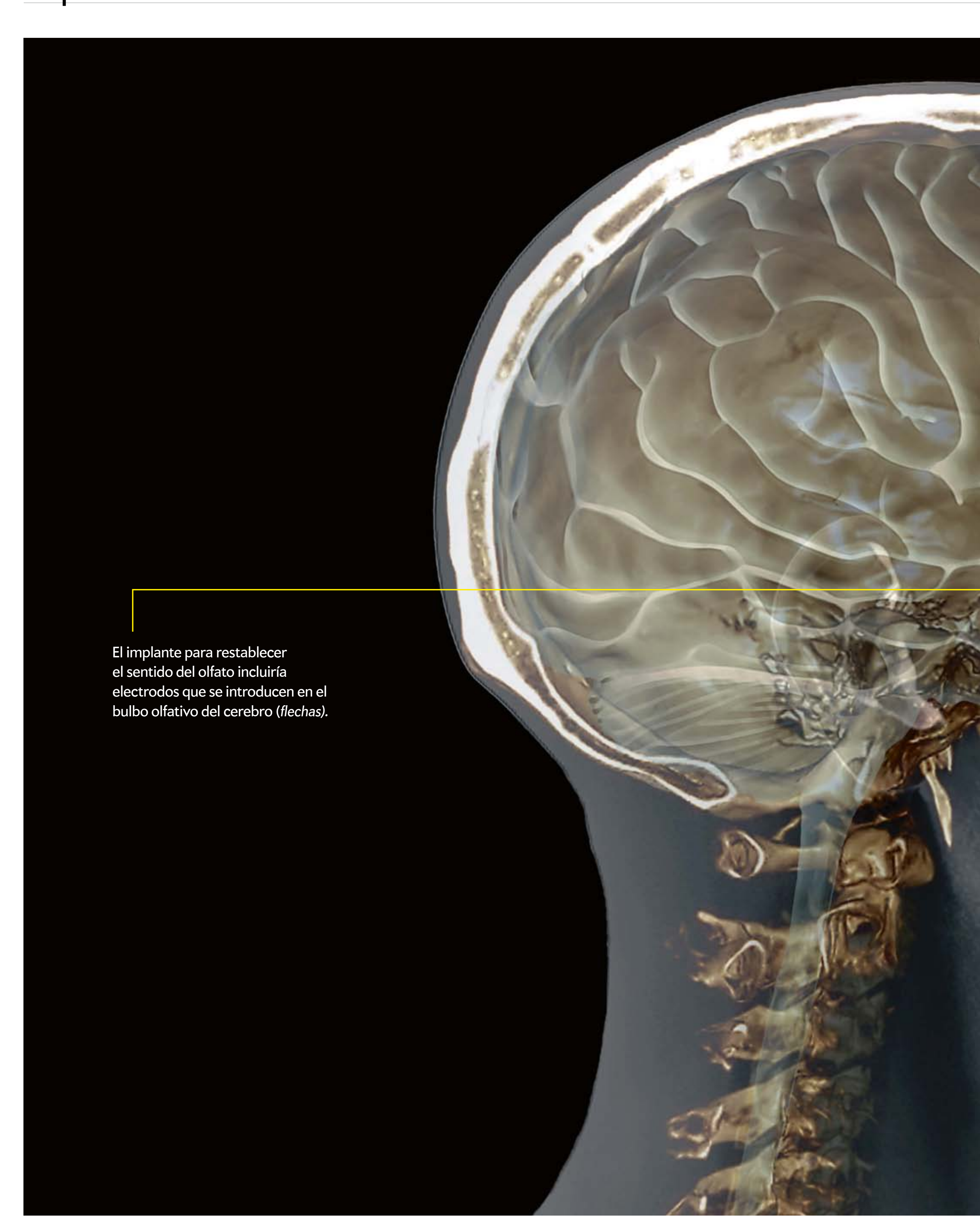
Cassel parte de la suposición habitual de que las ondas de radio u otras señales electromagnéticas serán las que nos brinden la primera prueba de la existencia de otras civilizaciones en la galaxia. Sin embargo, el mejor método para explorar la Vía Láctea no sería ese, sino construir sondas capaces de autorreplicarse. Conocidas como «máquinas de Von Neumann», dichas sondas podrían viajar a otras estrellas y hacer copias de sí mismas a partir de los materiales que encontrasen a su alrededor. Dado que el número de máquinas crecería de manera exponencial, bastarían unos pocos millones de años para que acabaran visitando todas las estrellas de la galaxia. El coste de un proyecto así sería similar al del telescopio espacial James Webb, ya que, después de que partieran las primeras máquinas, las demás no conllevarían ningún gasto. Así pues, la llamada «paradoja de Fermi» (si hay otras civilizaciones en la galaxia, ¿por qué no han llegado hasta nosotros?) sigue siendo hoy tan penetrante como siempre.

Tyler hace una excelente observación en la que, por falta de espacio, no pude entrar en el artículo. La cuestión de por qué nuestro universo parece ser «perfecto» constituye, de hecho, un rompecabezas teórico y es uno de los temas tratados en mi libro In search of the multiverse *(«En busca del multiverso»; Allen Lane, 2009).*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



El implante para restablecer el sentido del olfato incluiría electrodos que se introducen en el bulbo olfativo del cerebro (*flechas).*

SCIENCE SOURCE

NEUROTECNOLOGÍA

Recuperar el olfato

Un dispositivo semejante a un implante coclear permitiría percibir de nuevo los olores

Cuando Scott Moorehead explica a otros que no percibe ningún olor, suelen bromear sobre lo afortunado que es: los pañales sucios o las ventosidades no son problema para él. «Todos son muy ocurrentes», afirma con un retintín de sarcasmo. Pero su carencia total de olfato también significa que es incapaz de detectar una fuga de gas o notar si la comida se está quemando. Es consciente de su olor corporal, así que pasa por la ducha a menudo. Y ha tenido que abandonar una de sus aficiones favoritas: degustar vinos de sabores exóticos.

Después de que una conmoción cerebral le dejara esta secuela hace seis años, lo perdido ha superado lo imaginable. «Saber que nunca volvería a sentir el aroma de mi mujer o de mis hijos» resultó difícil de asumir.

Los nervios olfativos suelen regenerarse tras una lesión, pues acogen algunas de las únicas neuronas que se renuevan con rapidez, pero la suya era demasiado grave: padece anosmia, la pérdida absoluta del sentido del olfato. Ahora participa en un esfuerzo incipiente, a cargo de las facultades de medicina de las universidades de la Mancomunidad de Virginia (UMV) y Harvard, que persigue crear un implante que ayude a los afectados por lesiones cerebrales a percibir de nuevo los olores cotidianos.

El estudio del olfato lleva décadas de retraso con respecto al de la visión o la audición, explica Joel Mainland, neurocientífico especializado en este sentido y miembro del Centro de los Sentidos Químicos Monell, en Filadelfia, ajeno a este nuevo trabajo. Los estudios reciben menos financiación que las investigaciones destinadas a otros sentidos, afirma. Además, en el olfato intervienen multitud de componentes sensoriales: mientras que la visión exige el concurso de tres tipos de receptores, en el gusto participan 40 y en el olfato, 400.

Sorprende el gran número de personas que padecen problemas olfativos, hasta el 23 por ciento de la población mayor de 40 años de EE.UU., según un estudio a escala nacional, o el 62,5 por ciento de los mayores de 80, según otro. El deterioro es fruto de las lesiones, los problemas sinusales crónicos, la herencia o el envejecimiento, afirma el catedrático de la UMV Richard Costanzo, estudioso del olfato desde hace cuarenta años y codirector de la iniciativa que persigue construir el nuevo aparato. A menudo tildado como intrascendente, el olfato contribuye al gusto, por lo que las personas con anosmia corren el riesgo de sufrir desnutrición o aislamiento social, explica.

Existen tratamientos regenerativos, aclara Mainland, como el entrenamiento olfativo, en que el afectado es expuesto reiteradamente a ciertos olores y practica para reconocerlos. Otras intervenciones pueden revelar las causas concretas de su pérdida, como la sinusitis crónica. Pero para quien ha sufrido daños como los de Moorehead, ningún tratamiento resulta eficaz.

Como cualquier otro sentido, la captación del olor consta de varias fases. Los aromas, técnicamente moléculas olorosas, penetran a través de la nariz o la boca y atraviesan una capa mucosa antes de fijarse a las neuronas dotadas de receptores olfativos. El contacto desencadena señales eléctricas que alcanzan ciertos puntos del bulbo olfativo del cerebro. «Una neurona puede responder a una galleta de chocolate pero no a un bizcocho, mientras su vecina puede hacer lo opuesto», explica Eric Holbrook, jefe de rinología en el Hospital de Oftalmología y Otología de Massachusetts y profesor adjunto en la Escuela de Medicina de Harvard. «Probablemente una neurona responda a varias sustancias, pero tienen cierta especificidad.»

Holbrook, que colabora con el equipo de la UMV, intenta hallar un atajo para estimular el bulbo olfativo y evocar así una sensación de olor. La meta planeada es un análogo del implante coclear: un aparato electrónico que restaura en parte la audición al convertir los sonidos en señales eléctricas que el cerebro interpreta. Los investigadores de la UMV y de Harvard esperan convertir las sustancias olorosas en impulsos eléctricos susceptibles de ser transmitidos e interpretados. Holbrook publicó el pasado febrero un estudio en *International Forum of Allergy and Rhinology* en el que planteaba que la electroestimulación de la cavidad nasal y los senos circundantes puede hacer que una persona sana perciba olores, aunque no estén presentes en realidad. Dista mucho de ser la recuperación del olfato perdido, pero es un paso importante, asegura Holbrook.

Un implante coclear consta de un procesador de sonidos externos, colocado detrás del pabellón auditivo, que alberga un micrófono y un microprocesador. Este componente transmite señales a un elemento interno situado bajo la piel que estimula los nervios de la cóclea o caracol, el órgano que convierte las vibraciones sonoras en impulsos nerviosos. De modo similar, el equipo conjunto de UMV y Harvard concibe un aparato colocado bajo la nariz, o en unas gafas, que incluiría un sensor de olores y un pequeño microprocesador externo, así como un componente interno que estimularía puntos del bulbo olfativo, explica Costanzo.

Daniel Coelho, cirujano de implantes cocleares en la UMV que colabora con Costanzo, opina que es preciso refinar los sensores para que distingan un número suficiente de olores, pues de lo contrario su utilidad sería escasa. El plan consiste en miniaturizar y acelerar el procesamiento olfativo a semejanza de las llamadas narices electrónicas, usadas en la detección de explosivos o de alimentos en mal estado. Además, los inventores deben determinar el mejor modo de implantar con seguridad en el quirófano el aparato que estimula el cerebro para percibir los olores.

Crear un implante así exigirá años, advierte Coelho, pero no es imposible. «La idea está bastante clara. No estamos inventando nada radicalmente nuevo», señala. Más bien el equipo está aunando de un modo inédito las técnicas ya existentes.

Moorehead, que sufrió la lesión a raíz de una caída en monopatín cuando enseñaba a ir en él a su hijo de seis años, no es optimista sobre la posibilidad de recuperar el olfato. Pero no podía dejar pasar la oportunidad de ayudar a los demás, investigadores incluidos. «Resulta tan obvio: es lo que se supone que debía hacer», declara.

—Karen Weintraub



ETHAN DANIELS, GETTY IMAGES

BIOLOGÍA MARINA

Refugiados coralinos

En el pasado los corales migraron para huir del calentamiento del agua

Conforme el planeta y los mares se calientan, los lugares donde hasta hace poco prosperaba el coral resultan cada vez menos habitables. A causa del inusitado ascenso de la temperatura, gran parte de la Gran Barrera de Coral australiana sufrió en 2016 y 2017 un blanqueo masivo que convirtió auténticas exhibiciones de vistosos corales en monótonas masas emblanquecidas.

Pero los paleontólogos han descubierto un paraíso al que se podría trasladar uno de los arrecifes de la región para escapar al sobrecalentamiento. Lo conseguiría a través de las corrientes oceánicas, cuando el coral se halla en su fase larvaria, suspendido en el agua. Con el estudio de fósiles procedentes de la bahía de Daya, justo al noreste de Hong Kong, en el mar de la China Meridio-



CORALES BLANDOS (*Sinularia*) blanqueados en la bahía de Buyat, Indonesia.

nal, un equipo de investigación descubrió que, durante períodos de calentamiento acaecidos en el pasado remoto, los arrecifes coralinos migraron desde las cálidas aguas ecuatoriales hasta latitudes subtropicales más acogedoras.

«Hemos visto que los corales de latitudes altas que circundan China surgieron durante períodos cálidos precedentes», afirma Tara Clark, paleoecóloga de la Universidad de Wollongong. En 2015, encabezó una expedición científica a la citada bahía. Allí tomaron al azar muestras de corales muertos y calcularon su antigüedad con técnicas de datación radioisotópicas. Los antiguos arrecifes crecieron hace entre 6850 y 5510 años, según han descrito el pasado enero en *Geology*, lo cual coincide con una época en que la temperatura del mar de la China Meridional y de los mares cercanos era en promedio uno o dos grados más cálida que en la actualidad. Esta tendencia indica que algunos arrecifes podrían crecer en lugares como la bahía de Daya en las décadas venideras, a medida que aumente la temperatura.

La idea de trasladar arrecifes amenazados no es nueva, pero usar el registro fósil para localizar tales lugares sí lo es bastante, matiza John Pandolfi, paleoecólogo marino de la Universidad de Queensland que no ha participado en el novedoso trabajo. «Es primordial conocer la dinámica de las comunidades ecológicas y sus respuestas al cambio ecológico», asegura. Ese tipo de alteraciones suele suceder en escalas cronológicas más extensas que las humanas, por lo que el registro fósil puede revelar las que se producen a tan largo plazo, destaca Pandolfi.

Si bien las pruebas fósiles indican que la bahía de Daya pudo ser en su día un paraíso para el coral, ahora hay obstáculos para hacer de ella un refugio acogedor, explica Clark. No todos los corales están preparados para viajar a través del mar hasta un nuevo hogar. Y la bahía sufre una intensa contaminación, por lo que podría no ser idónea para albergarlos. Pero a la luz del nuevo descubrimiento, Clark afirma: «Deberíamos hacer lo posible por preservar esas zonas, por si acaso».

—Lucas Joel

PALEONTOLOGÍA

Dinosaurio liliputiense

Un carnívoro dejó las pisadas de dinosaurio más pequeñas que se conocen

Una serie de huellas de un centímetro de largo y 110 millones de años de antigüedad halladas en Corea del Sur pertenecieron al que podría ser el dinosaurio no aviar más minúsculo descubierto jamás. «Las dejaron varios raptores increíblemente pequeños», afirma Anthony Romilio, coautor del estudio que detalla el hallazgo y a la sazón investigador posdoctoral de paleontología en la Universidad de Queensland. «Antes de nuestro hallazgo, pocos habrían imaginado que un raptor pudiera ser tan chico como para que dos o tres cupieran fácilmente en la palma de la mano.»

Cada huella recuerda al número 11, lo que indica que caminaban sobre dos dedos del pie. Los únicos dinosaurios conocidos que dejan pisadas similares son los dromeosaurios, una familia de veloces carnívoros entre los que figura *Velociraptor mongoliensis*, archiconocido por *Parque Jurásico*. Estos raptores poseían cuatro dedos en cada pie; uno era diminuto como el espolón del gato y otro estaba rematado en una garra curva que se mantenía alzada sobre el suelo. Los dromeosaurios de la talla de un gorrión que dejaron esas pisadas tendrían caderas de tan solo cuatro o cinco centímetros de alto. Descubiertas en la ciudad surcoreana de Jinju, fueron descritas en *Scientific Reports* el pasado noviembre por un equipo dirigido por el coreano Kyung Soo Kim, de la Universidad Nacional de Educación de Chinju.

Las impresiones tal vez fueron dejadas por un dinosaurio adulto más pequeño que ningún otro conocido que no sea un ave, explica Romilio. No puede descartarse que sus autores fueran crías; en un yacimiento a 30 kilómetros de distancia se han descubierto huellas similares unas diez veces mayores, quizá pertenecientes a un adulto. Si se hallaran fósiles del esqueleto en la región podríamos saber qué hipótesis es la correcta, aclara Romilio.

«Mucha gente supone que las pisadas de un dinosaurio producirían hoyos enormes y profundos, y es cierto que algunos dejaban depresiones bastante grandes en el suelo», afirma Anthony Martin, paleontólogo en la Universidad Emory especializado en icnofósiles (huellas y otros rastros de actividad biológica que han quedado fosilizados), ajeno al estudio. Pero el nuevo hallazgo «nos demuestra que en ocasiones debemos pensar en pequeño». Aunque las huellas fueran en realidad obra de crías recién nacidas, añade, nos indicarían que eran precoces y abandonaban el nido al poco de nacer, como algunas aves actuales.

—John Pickrell

TECNOLOGÍA MÉDICA

Una *app* para el cáncer de cuello uterino

Un algoritmo de inteligencia artificial diagnostica la enfermedad a partir de imágenes


CÉLULA cancerosa del cuello uterino.

Uno de los métodos más habituales y económicos para detectar el cáncer de cuello uterino es la citología vaginal (o prueba de Papanicolaou), en que se raspan células del útero de la paciente que se remiten al laboratorio para su examen. El inconveniente estriba en que este método exige medios materiales y experiencia médica que no siempre están al alcance en países de renta baja. Ahora se está diseñando una aplicación que pueda usar la inteligencia artificial para detectar células precancerosas o cancerosas con una simple fotografía.

Su desarrollo corre a cargo de investigadores de los Institutos Nacionales de Salud (NIH) de EE.UU. y de Global Good; esta última es un empresa conjunta de Bill Gates y de la firma de innovación Intellectual Ventures. Los resultados preliminares, publicados en línea el pasado enero en *Journal of the National Cancer Institute*, indican que una estrategia así mejoraría notablemente el diagnóstico del cáncer en entornos con recursos limitados.

La incidencia del cáncer de cuello uterino es mayor en países y regiones que carecen de los recursos para practicar las citologías vaginales. En esos lugares, el personal sanitario suele emplear técnicas de diagnóstico menos fiables, en que el frotis tomado del útero se diluye en ácido acético y se examina a simple vista en busca de manchas blancas que puedan delatar células anómalas.

A lo largo de siete años, investigadores de los NIH han fotografiado periódicamente el cuello uterino de más de 9400 mujeres en Costa Rica. Usaron las imágenes para entrenar a un algoritmo de inteligencia artificial a reconocer las características del tejido alterado y predecir la aparición del cáncer. Cuando el algoritmo analiza las nuevas imágenes, lo hace mejor que un facultativo experto con su examen visual.

«Nos sorprendió comprobar que los ordenadores distinguían con mucha mayor sensibilidad y claridad los casos precancerosos de los que no lo eran», confiesa Mark Schiffman, epidemiólogo molecular del Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU. y autor principal del artículo. «Creía de veras [que lo de la IA] era una broma.» Los creadores planean instalar el algoritmo en teléfonos móviles y pretenden entrenar a futuras iteraciones del programa para que analicen fotografías tomadas con cámaras digitales.

—*Wudan Yan*

PALEONTOLOGÍA FORENSE

Atrapar al asesino

Una nueva técnica identifica los depredadores entre la fauna prehistórica

Hoy en día la policía recurre al análisis del ADN para atrapar al asesino. Pero ¿y si lo que sucedió en el escenario del crimen ha permanecido expuesto a los elementos durante miles de años? El ADN no siempre resiste el paso del tiempo, por lo que cuando un paleontólogo intenta averiguar qué tipo de carnívoro mató a un animal fosilizado, a menudo acaba dando carpetazo al caso.

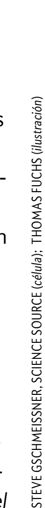
Ahora, un nuevo método ayudará previsiblemente a conocer la identidad de esos carnívoros prehistóricos. Se basa en el hecho de que cuando un depredador devora una presa (por ejemplo, cuando una lechuza caza un roedor en plena noche) sus jugos gástricos dejan marcas microscópicas en la superficie de los huesos ingeridos.

Esas marcas presentan patrones que son exclusivos del tipo de cazador, lo que las convierte en una suerte de huellas dactilares que podrían ayudar a resolver un caso, explica Rebecca Terry, paleontóloga en la Universidad Estatal de Oregón y jefa del equipo que ha estudiado las marcas. Añade que la técnica contribuirá a obtener una imagen de los tipos de depredadores que vagaban por los ecosistemas prehistóricos, sobre todo en zonas donde los fósiles escasean. «Es muy potente», asegura.

Ella y su equipo usaron un microscopio electrónico de barrido para examinar los restos óseos que las aves rapaces modernas regurgitan en egagrópilas después de comer. También analizaron las heces de mamíferos carnívoros. «El hueso que ha sido devorado por una rapaz nocturna es claramente diferenciable del que lo ha sido por un ave de presa diurna» o un mamífero, según Terry. Las marcas que quedan impresas en los huesos al paso por el estómago de un búho o una lechuza tienden a ser relativamente cortas y concentradas; las dejadas por el de un gavilán o un milano, por ejemplo, o por el de un mamífero, suelen ser más largas y quedan más separadas, según el estudio, que vio la luz el pasado noviembre en *PALAIOS*. Además, las marcas propias de las rapaces nocturnas y los mamíferos actuales, añade Terry, resultan «indiferenciables» de las halladas en huesos fósiles devorados por depredadores similares en el pasado remoto.

Este descubrimiento ayudará a responder una de las preguntas más básicas que un paleontólogo se hace cuando sospecha que el fósil que tiene ante sí pertenece a una presa devorada: «¿Quién lo hizo?». Joshua Miller, paleobiólogo de la Universidad de Cincinnati que no ha participado en la reciente investigación, afirma: «Uno examinará un hueso y tendrá cierta noción de por qué estaba donde se encontró. Y eso es sensacional».

—*Lucas Joel*



Tome su medicamento... ahora

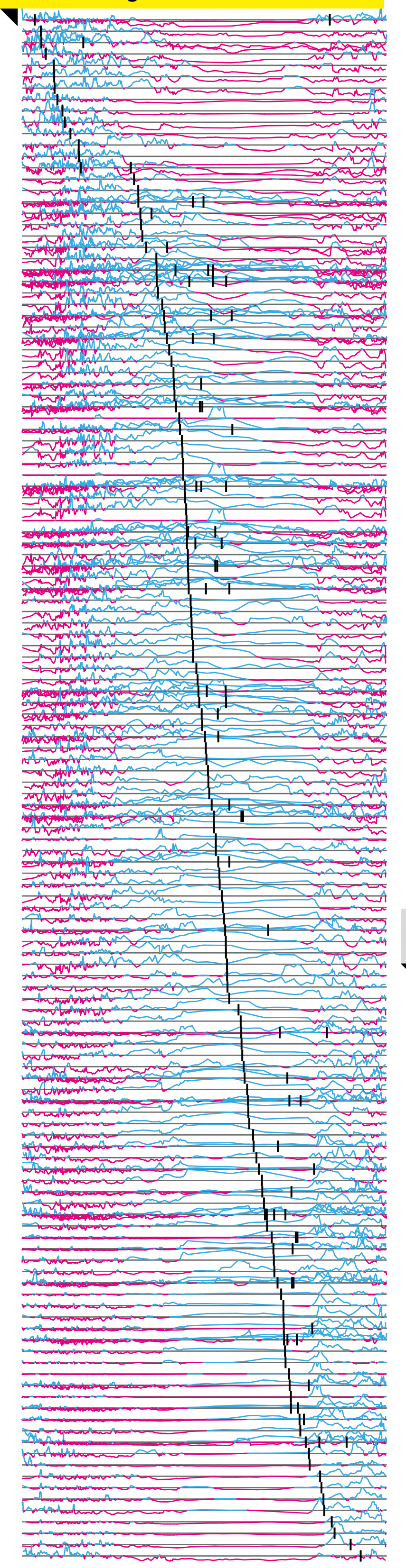
Los fármacos podrían ser más eficaces si se consumieran cuando las proteínas sobre las que actúan están más activas

El médico le indica al paciente que tome las pastillas por la mañana, por la tarde o con las comidas, entre otros momentos. Pero un nuevo estudio ha descubierto que multitud de genes que controlan la producción de proteínas sobre las que se dirigen los fármacos presentan un ciclo diario de actividad regido por los ritmos circadianos del organismo. Los medicamentos destinados a tratar la hiperactividad de la glándula tiroides, por ejemplo, podrían ser plenamente eficaces si se tomasen cuando ciertos genes tiroideos funcionasen al máximo. Y viceversa, ingerirlos cuando estos permanecen en reposo podría ser inútil. Además, Marc D. Ruben, investigador del Hospital Pediátrico de Cincinnati que ha dirigido el estudio, afirma que la sincronización de la toma «permitiría reducir la dosis del fármaco para lograr el resultado deseado o mitigar los efectos secundarios con la misma dosis».

—Mark Fischetti



Genes cardiovasculares con expresión cíclica a lo largo de las 24 horas

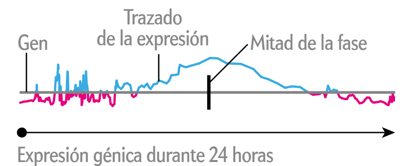


Estudio de los genes cardíacos

Los 136 genes que afectan a las cavidades cardíacas, la aorta, las arterias coronarias o la arteria femoral presentan un ciclo diario (*columna alta*). Muestran un patrón de actividad sumamente alta (*azul*) que alterna con otro de baja (*rojo*); la mayoría de esas fases cubren una franja de tiempo. En cambio, en los genes cardíacos que no muestran un ciclo diario (*columna pequeña*), el incremento y el descenso de la actividad son aleatorios y breves. Algunos fármacos comunes, como los betabloqueantes, que se toman contra la hipertensión arterial, actúan durante poco tiempo, por lo que podrían ser más eficaces si se consumieran cuando los genes de expresión cíclica permanecen activos.

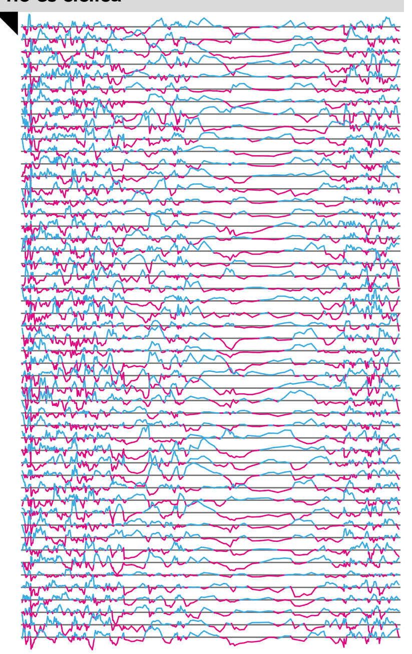
Cómo interpretar las columnas de trazados

Cada línea horizontal representa un gen. La línea aserrada muestra la actividad génica, o expresión, durante 24 horas: el color rojo indica que la actividad es baja; el azul que es alta. La corta barra vertical señala el pico de la fase diaria; aparece pronto en los genes situados en la parte superior de la gráfica, y tarde en los de la parte inferior.



Algunos genes afectan hasta a cuatro tejidos cardíacos distintos y pueden expresarse de modo diferente en cada uno de ellos (en una misma línea se observan trazados superpuestos y varias barras verticales).

Genes cardiovasculares cuya expresión no es cíclica



FUENTE: «A DATABASE OF TISSUE-SPECIFIC RHYTHMICALLY EXPRESSED HUMAN GENES HAS POTENTIAL APPLICATIONS IN CIRCADIAN MEDICINE», MARC D. RUBEN ET AL., EN *SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE*, 12 DE SEPTIEMBRE DE 2018; MARTIN KRZYWINSKI (*gráficos*)



COGNICIÓN

Cómo convertir un fracaso en un éxito

Varias investigaciones revelan métodos prácticos para sacar partido de los reveses

A menudo se dice que el fracaso es la madre del éxito. Y aunque puede que haya algo de cierto en ese cliché, la verdad es que no nos da ninguna receta para transformar una derrota en victoria, apunta Emmanuel Manalo, profesor de psicología educativa de la Universidad de Kioto. Como resultado, «aunque sabemos que no debemos rendirnos cuando las cosas salen mal, al final lo hacemos», comenta el investigador.

Manalo y Manu Kapur, profesor de ciencias del aprendizaje de la Escuela Politécnica de Zúrich, publicaron el pasado diciembre un número monográfico de la revista *Thinking Skills and Creativity* dedicado a cómo sacar partido del fracaso, con un total de 15 estudios que conforman una guía para docentes y pedagogos. Por ejemplo, un artículo concluye que, cuanto antes y más a menudo yerre un estudiante en una tarea, como construir un robot, más rápido logrará reponerse y mejorar. Otro confirmó que los consejos sobre el fracaso resultan más constructivos cuando quien los hace se muestra comprensivo y cuando el receptor está preparado para enfrentarse a emociones negativas.

Manalo y sus coautores también presentaron su propia investigación, centrada en superar una forma básica y cotidiana de fracaso: dejar una tarea a medias. Pidieron a 131 estudiantes universitarios que redactaran un trabajo sobre sus experiencias escolares pasadas. La mitad de ellos recibieron instrucciones para estructurar su escrito; los demás tuvieron que arreglárselas solos. A todos, sin embargo, se les interrumpió antes de que hubieran terminado. Los investigadores comprobaron que los estudiantes del primer grupo estaban más motivados para completar sus textos que aquellos que carecían de orientaciones, incluso si a estos últimos les faltaba menos para acabar. En otras palabras: saber cómo terminar era más importante que estar cerca de hacerlo.

Los investigadores bautizaron el hallazgo como «efecto Hemingway», dado que el estadounidense recomendaba no parar de escribir hasta tener claro lo que sucedería a continuación en la historia, a fin de evitar el «bloqueo de la página en blanco» al retomarla. Manalo cree que aprender a fallar ocasionalmente puede evitar fracasos continuos en numerosas tareas, desde completar una tesis o aprender un idioma hasta inventar un nuevo aparato.

Quitar hierro al fracaso y enseñar a los estudiantes a no temerlo hace que les resulte más fácil alcanzar sus metas, apunta Stephanie Couch, directora ejecutiva del programa Lemelson-MIT, una organización sin ánimo de lucro dedicada a incentivar y apoyar a los inventores. Couch, cuyo trabajo también apareció en el monográfico, añade que «en realidad, deberíamos concebir el fracaso como parte de un proceso iterativo hacia el éxito». *—Rachel Nuwer*

COMPLEJIDAD

Física para analizar la historia del arte

Un programa informático emplea los conceptos de entropía y complejidad para clasificar cuadros y estudiar la evolución de la pintura

Para un romántico, el reciente trabajo de Haroldo Ribeiro puede parecer prosaico. Este físico y sus colaboradores han desarrollado un programa informático capaz de analizar un cuadro y asociarle una serie de números. Ribeiro, de la Universidad Estatal de Maringá, en Brasil, ha aplicado su método a unos 140.000 cuadros digitalizados de la enciclopedia WikiArt con el objetivo de encontrar tendencias en la evolución de los estilos pictóricos.

La técnica, descrita el pasado mes de septiembre en la revista *PNAS*, se basa en evaluar la complejidad y la entropía de las obras. La complejidad corresponde a la variabilidad de los distintos patrones que aparecen en las imágenes, los cuales pueden ser desde muy cambiantes (mayor complejidad) hasta uniformes (menor complejidad). La entropía determina el grado de desorden en el cuadro: cuanto más «regular» sea, menos entropía tendrá.

El algoritmo va analizando cuadrículas de dos por dos píxeles y les asigna un valor numérico relacionado con la entropía y otro con la complejidad. Los investigadores observaron que las diferencias en esos parámetros se correspondían con las transiciones estilísticas ocurridas a lo largo de la historia del arte. El arte moderno, con contornos difusos y pinceladas sueltas, generalmente posee una complejidad baja y una entropía elevada. En cambio, el posmoderno, con un estilo más simple, objetos reconocibles y contornos bien definidos (como las latas de sopa de Andy Warhol), presenta una complejidad elevada y poca entropía. A finales de los años sesenta del siglo pasado, el arte moderno se transformó con rapidez en posmoderno. El algoritmo es capaz de cuantificar cuán extrema fue esa transición.

Los autores sostienen que estos sencillos parámetros podrían usarse para entender la evolución del arte, obtener información sobre diversos periodos estilísticos y determinar las interacciones que se produjeron entre ellos. A partir de estos patrones, el programa podría servir incluso para determinar el estilo de obras poco conocidas.

Maximilian Schich, profesor de arte y tecnología de la Universidad de Texas, respalda la investigación. «Un aspecto muy elegante es que analiza la complejidad a nivel local, estudiando píxeles y los píxeles circundantes», comenta. «Uno podría decir que eso es demasiado simplista y que no explica la obra en su conjunto. Pero se trata de una investigación valiosa.» *—Jess Romeo*



LAS OBRAS DE POLLOCK se caracterizan por poseer un alto grado de entropía.

GETTY IMAGES (*arriba*); ROB KIM, GETTY IMAGES (*abajo*)

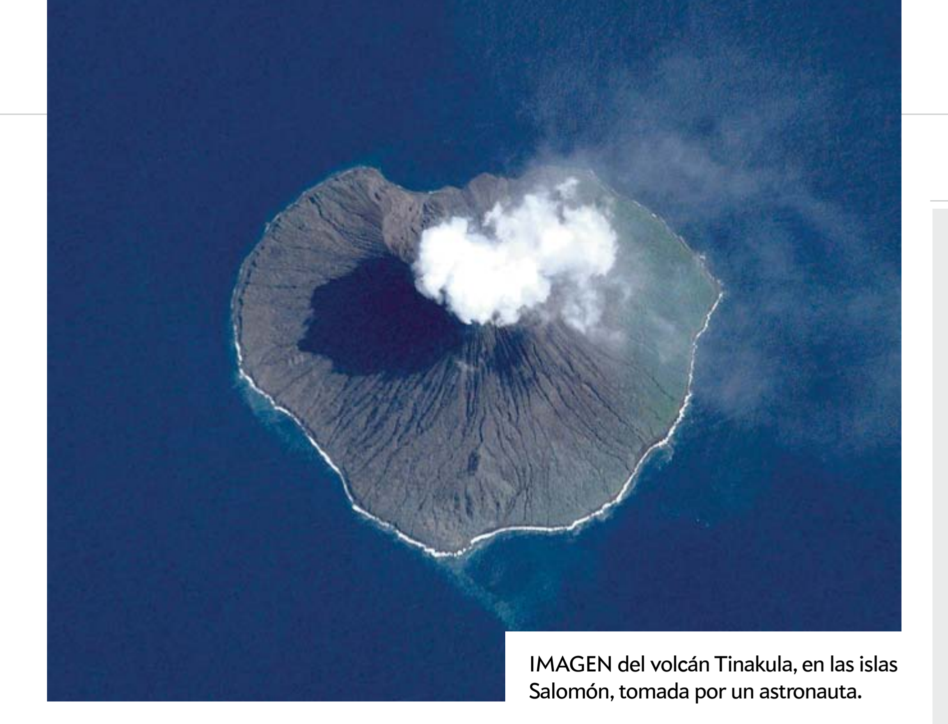


IMAGEN del volcán Tinakula, en las islas Salomón, tomada por un astronauta.

CIENCIAS DE LA TIERRA

Estudiar los volcanes desde el espacio

Un observatorio en órbita puede analizar signos de erupciones cada dos horas

A fin de obtener una visión global de la vulcanología del planeta, los investigadores han decidido observar las erupciones desde lejos: a 1,6 millones de kilómetros, para ser precisos. Esa es la distancia a la que orbita el Observatorio Climático del Espacio Profundo (DSCOVR), un satélite operado en parte por la NASA. DSCOVR es capaz de detectar los gases expulsados por los volcanes, lo que le permite obtener «instantáneas» de las erupciones cada una o dos horas. A menudo, estos eventos arrojan cenizas que pueden provocar averías en los motores de los aviones, por lo que tenerlos controlados puede ayudar a identificar con rapidez zonas peligrosas en el espacio aéreo.

En la Tierra hay unos 1500 volcanes potencialmente activos. Muchos de ellos se encuentran en áreas remotas, por lo que resulta difícil estudiar sus erupciones con regularidad, afirma Simon Carn, vulcanólogo en la Universidad Tecnológica de Míchigan. «Los volcanes de EE.UU. están bastante bien vigilados, pero en otras partes del mundo la situación es muy distinta», añade el experto. «No hay duda de que el seguimiento por satélite es necesario.»

Carn y sus colaboradores emplearon un instrumento del satélite, la Cámara de Imagen Policromática de la Tierra (EPIC), para observar 16 erupciones y tomar mediciones en el ultravioleta del dióxido de azufre (SO_2), un gas emitido con frecuencia por los volcanes y fácil de identificar ya que escasea en la atmósfera, explica Carn. El aparato proporcionó imágenes de la superficie de la Tierra con una frecuencia de entre 68 y 110 minutos, muy superior a lo que permiten la mayoría de las cámaras ultravioleta en órbita. «Las erupciones pueden desarrollarse muy rápido, por lo que cuanto mayor sea la frecuencia de las observaciones, mejor podremos estudiarlas», asegura Carn.

Según un artículo que los investigadores publicaron el pasado octubre en *Geophysical Research Letters*, EPIC midió los niveles de SO_2 tan solo unas horas después del comienzo de varias erupciones y reveló cambios que otros satélites no habían detectado. Por ejemplo, mostró que la erupción que el 20 de octubre de 2017 experimentó el volcán Tinakula, en el Pacífico Sur, en realidad consistió en dos eventos explosivos independientes que liberaron distintas cantidades de SO_2.

Para Andrew Hooper, vulcanólogo de la Universidad de Leeds que no participó en la investigación, el trabajo representa «un gran paso adelante» en el estudio de las nubes volcánicas. El investigador conviene en que tales observaciones podrían aprovecharse para mitigar los efectos de las erupciones volcánicas.

Actualmente, DSCOVR solo transmite datos a la Tierra cuando el satélite se encuentra al alcance de las antenas receptoras, situadas en Virginia y Alaska. Instalar más de ellas alrededor del mundo permitiría obtener y analizar los datos de manera casi instantánea, señala Carn. «Ahora vamos con uno o dos días de retraso respecto al tiempo real», concluye el investigador.

—*Katherine Kornei*

AGENDA

CONFERENCIAS

5 de abril
¿En serio llegamos a la Luna?
Eugenio M. Fernández Aguilar, físico y divulgador científico
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

15 de abril
¿Cómo se mide el tiempo con la tabla periódica?
Joan O. Grimalt, CSIC
Residencia de Investigadores
Barcelona
www.taulaperiodica.cat

24 de abril
Del «no podemos comer nada» al «nunca hemos estado más seguros»
Gaspar Ros, Universidad de Murcia
M.ª Teresa García Esteban, Universidad Complutense de Madrid
Museo Arqueológico Nacional
Madrid
www.man.es



25 de abril
Roboética
Carme Torras, Instituto de Robótica e Informática Industrial
Auditorio Josep Irla
Gerona
catedra.clinicabofill.net

EXPOSICIONES

Hasta el 30 de abril
Minerales inexistentes
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
www.ucm.es

OTROS

Hasta el 30 de abril — Concurso
Ciencia Clip Latinoamérica y Caribe
Vídeos de ciencia
Para estudiantes de secundaria de Latinoamérica y el Caribe
Organiza: Instituto de Física Teórica de Madrid y otras organizaciones
www.ift.uam-csic.es

POLÍTICA CIENTÍFICA

Cómo mejorar la financiación de la investigación teórica

Asignar becas en función de proyectos sobre el trabajo futuro carece de sentido en las disciplinas teóricas. Un modelo matemático del sistema científico permite explorar políticas de financiación alternativas y mucho más eficientes

MIGUEL NAVASCUÉS Y COSTANTINO BUDRONI



EL SISTEMA ACTUAL de asignación de fondos a la investigación no se basa en criterios científicos. Además, no se ajusta a las necesidades de las disciplinas teóricas. Un análisis más cuidadoso permitiría distribuir los recursos de manera más eficiente.

Cada vez más, universidades e institutos científicos exigen a sus empleados que consigan ayudas para la investigación. Estas becas, otorgadas por organismos nacionales o europeos, las utiliza el científico para pagar su propio sueldo y el de los miembros de su grupo. La concesión de tales ayudas se rige por un sistema de presentación de proyectos: el solicitante debe avanzar a la autoridad competente cuáles serán los objetivos de su investigación para los próximos cuatro o cinco años. Pero no solo eso: debe también explicar cómo piensa alcanzarlos. Esta segunda parte recibe el nombre de «metodología».

A primera vista, lo anterior parece un modelo razonable para asignar fondos, ya que permite financiar cualquier experimento científico. En tal caso, el objetivo consiste en verificar las predicciones de una teoría, mientras que la metodología corresponde al diseño del experimento. Pasar del diseño a la realización práctica requiere fondos y varios años de trabajo. Es lógico, pues, financiar la investigación experimental con este tipo de becas.

Sin embargo, no toda investigación es experimental. ¿Se ha preguntado el lector de dónde procede la teoría que los experimentadores intentan verificar? Viene de la cabeza de investigadores teóricos: personas como científicos computacionales, economistas, matemáticos y físicos teóricos.

El modelo de financiación que acabamos de describir deja de lado a todos ellos. La razón se debe a que, como explicaremos a continuación, redactar proyectos de investigación en disciplinas teóricas no tiene ningún sentido. Como consecuencia,

adjudicar dinero basándose en ellos da como resultado un procedimiento costoso e ineficiente.

Hemos llegado a esta situación porque hasta ahora los mecanismos de financiación de la ciencia no se han decidido de forma científica. Para salir de esta crisis, hace falta un debate científico abierto sobre las ayudas a la investigación. Necesitamos una teoría de la investigación científica: una teoría con modelos, hipótesis y experimentos.

En un trabajo reciente y aceptado para su publicación en la revista *PLOS ONE* hemos propuesto un modelo de tales características. Nuestros resultados sugieren algunos mecanismos que, sin recurrir al sistema actual basado en proyectos, podrían mejorar notablemente la producción científica en las disciplinas teóricas.

¿Proyectos teóricos?

¿Por qué decimos que redactar proyectos de investigación en las disciplinas teóricas carece de sentido? En primer lugar, porque los investigadores teóricos rara vez mantienen objetivos a largo plazo. Ello se debe a que, muy a menudo, durante una investigación que partió con cierta meta aparece una idea que invita a seguir otro camino. Y el investigador haría muy mal si no lo siguiera. Pensemos en la historia (apócrifa) de Newton y la manzana: después de que esta cayera sobre su cabeza, Newton tuvo que elegir entre descubrir la ley de la gravitación universal o seguir contemplando cabras.

En segundo lugar, pedirle una metodología a un investigador teórico es un despropósito. Para verlo, consideremos el siguiente ejemplo.

Un número primo es un número natural que solo es divisible por otros dos: él mismo y 1. El 2, el 3, el 5 y el 7 son ejemplos de números primos. No así el 4, que además de entre 4 y 1 puede dividirse también entre 2. Un teorema que se atribuye a Euclides asevera que existen infinitos números primos.

He aquí la demostración. Supongamos que existe un número finito de números primos. Si los ponemos en una lista, tenemos que, para cualquier número natural, existe al menos un elemento de la lista que lo divide. Ahora multipliquemos todos los números de esa lista y añadamos 1. El resultado, M, será un número natural. Sin embargo, si dividimos M por cualquier número de la lista, obtendremos de resto 1: es decir, ningún número de la lista divide a M. De esta contradicción se deduce que el conjunto de números primos no puede ser finito.

Si el lector está pensando que este teorema carece de relevancia para la sociedad, se equivoca. Los sistemas de encriptación que usamos cada vez que hacemos una compra en línea se basan precisamente en la existencia de infinitos números primos.

Ahora imaginemos que en la antigua Grecia hubiera existido un sistema de becas, y que Euclides hubiese necesitado una para investigar los números primos. Supongamos además que Atenea, la diosa de la sabiduría, hubiese revelado a Euclides en un sueño que, en efecto, existen infinitos números primos. La tarea de Euclides consistiría, pues, en demostrar el teorema. ¿Qué habría escrito Euclides en la metodología?

Un segundo antes de que se le ocurriese multiplicarlos todos, Euclides no tenía ni idea de cómo demostrar que había infinitos números primos. Por tanto, no habría podido escribir nada. Y un segundo después ya tenía la demostración completa. Este es el principal problema al que nos enfrentamos los teóricos cuando redactamos un proyecto de investigación: para cuando tenemos clara la metodología, ya no necesitamos la beca.

Cuando nos piden que expliquemos qué vamos a descubrir y cómo vamos a lograrlo en los próximos cuatro años —¡en algunas becas, incluso mes a mes!—, no podemos hacer otra cosa que inventarnos un cuento de hadas. Esto requiere tiempo y esfuerzo. Tanto que, de hecho, algunas instituciones contratan a escritores profesionales para ayudar al investigador a preparar sus proyectos. Durante ese tiempo, que puede suponer varios meses al año, los teóricos no podemos investigar.

Un modelo de la actividad científica

Con miras a superar tales dificultades, en nuestro artículo abogamos por una política de becas que no esté basada en proyectos y en la que los fondos para cada centro se otorguen en función de su producción científica reciente. Esta puede medirse, por ejemplo, haciendo que un comité de expertos evalúe con los criterios adecuados las publicaciones de cada centro. Para estudiar la viabilidad de esta idea, hemos formulado un modelo matemático del sistema de investigación.

Partamos de la hipótesis de que la producción científica de un centro viene dada por cierta función, a la que llamaremos «función de productividad». Un aspecto importante es que esta función resulta desconocida tanto para el propio centro como para la agencia de financiación correspondiente (en España, el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades). En todo caso, sí sabemos que dicha función dependerá de los fondos de los que disponga el centro: la producción científica de un instituto no será la misma si este cuenta con un euro o con un millón de euros para investigar. En general, nuestra función de productividad será probabilística. También podrá cambiar con el tiempo, conforme el centro adquiera nuevos investigadores prometedores... o los pierda.

Consideremos ahora un conjunto de centros de investigación. El cometido de la agencia financiadora consiste en distribuir su presupuesto cuatrienal de forma que la producción científica total (la suma de la obtenida por todos los centros) se acerque al máximo tanto como sea posible. ¿Cómo lograrlo?

Lo primero que se le ocurre a uno es distribuir el dinero de modo que el cociente entre la producción futura media de cada centro y los fondos asignados (la ciencia por euro, podríamos decir) sea el mismo para todos. El razonamiento es el siguiente: si un instituto presenta un cociente ciencia/euro mayor que los demás, significa que puede producir más ciencia con menos dinero; por tanto, tiene sentido pensar que aumentaremos la producción total sustrayendo fondos del resto para dárselos a él. A esta forma de distribuir el dinero la llamaremos «cuenta de la vieja».

La cuenta de la vieja no proporciona una estrategia óptima. Sin embargo, como demostramos en nuestro trabajo, en el peor de los casos asegura la mitad de la producción máxima total.

Mecanismos reales de distribución

El lector se preguntará por qué, si nuestro objetivo consiste en repartir los fondos de forma óptima, deberíamos contentarnos con una aproximación. Ello se debe a que, como comentábamos arriba, ni la agencia gubernamental ni los propios centros de investigación conocen las funciones de productividad. Por tanto, nadie puede calcular la distribución óptima. De hecho, tampoco podemos aplicar la cuenta de la vieja, ya que para ello también necesitaríamos conocer las funciones de productividad.

Por fortuna, existen métodos sistemáticos de reparto de fondos que, al cabo de algunos cuatrienios, convergen hacia la distribución que proporciona la cuenta de la vieja. Eso garantiza que, si los aplicamos, acabaremos produciendo, como poco, la mitad de todo lo que podemos producir.

Uno de tales métodos es el que denominaremos «regla de tres». Según este, los fondos que recibe cada centro son proporcionales a su producción científica durante el cuatrienio anterior. Esta estrategia tiene la particularidad de que es transparente y no permite hacer trampas. Por ejemplo, un centro no puede obtener más fondos de los que le corresponden retrasando la publicación de algunos resultados para concentrarlos en un período más acorde a los plazos administrativos. Además, evita que los solicitantes de las disciplinas teóricas pierdan meses escribiendo proyectos que no se corresponden con la realidad.

Por otro lado, ¿está bien producir (como mínimo) el 50 por ciento de toda la ciencia posible? Por extraño que pueda parecer, la respuesta es afirmativa. Ello se debe a que las políticas de financiación actuales garantizan muchísimo menos. Hoy por hoy, la mayoría de las agencias de investigación aplican «políticas de excelencia». En la práctica, estas se traducen en que quienes más becas reciben son aquellos investigadores y centros que ya han obtenido otras muchas ayudas en el pasado. En nuestro artículo, argumentamos que la producción científica obtenida de esta manera puede llegar a ser una fracción arbitrariamente pequeña del máximo posible.

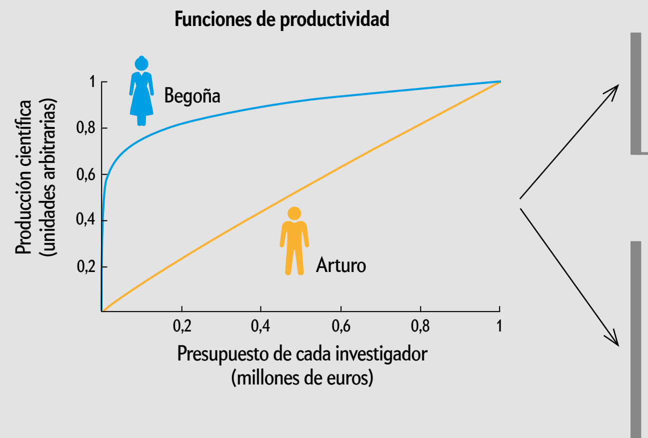
Más allá de los modelos

Llegados aquí, el siguiente paso consistiría en verificar que nuestra teoría describe correctamente la realidad. Pero eso no lo puede hacer un teórico: solo se puede demostrar experimentalmente mediante programas piloto de investigación.

FINANCIAR LA CIENCIA SIN NECESIDAD DE PROYECTOS

SUPONGAMOS que una agencia de financiación debe repartir un millón de euros entre dos científicos, Arturo y Begoña. El objetivo consiste en asignar los fondos de modo que la producción científica de Arturo más la de Begoña sea la máxima posible. Sin embargo, las políticas de financiación actuales, basadas en la presentación de proyectos, se quedan muy lejos de asegurar esa meta. Un modelo científico de la actividad investigadora sugiere métodos de reparto mucho más eficientes.

En condiciones ideales conoceríamos las «funciones de productividad» de los investigadores; es decir, cuánta ciencia puede producir cada uno con una cantidad dada de dinero. Ello permitiría calcular la distribución óptima, que maximiza la producción, así como una alternativa útil, la «cuenta de la vieja». Aunque esta última implica un reparto muy distinto, la producción total no cambia demasiado. Además, asegura que la producción total nunca será inferior al 50 por ciento de la máxima posible.



Distribución óptima
Los fondos se asignan de manera que la producción total sea máxima.

Producción total: 1,66

Begoña	Arturo
100.000 €	900.000 €

«Cuenta de la vieja»
Los fondos se asignan de manera que el cociente entre la productividad y los fondos recibidos sea el mismo para cada investigador.

Producción total: 1,19
Nunca es inferior al 50 por ciento de la máxima posible.

Begoña	Arturo
820.000 €	180.000 €

En realidad, ni la agencia ni los propios investigadores conocen las funciones de productividad, por lo que ninguna de las estrategias anteriores puede aplicarse. Sin embargo, un método factible, la «regla de tres», garantiza que, con el tiempo, el reparto convergerá al que proporciona la «cuenta de la vieja». Como consecuencia, esta estrategia asegura una producción igual o mayor que el 50 por ciento de la máxima. Eso es mucho más de lo que garantizan las políticas actuales basadas en la presentación de proyectos.

«Regla de tres»
Los fondos se asignan en función de la productividad reciente de cada investigador. Con el tiempo, este reparto acaba convergiendo al que proporciona la «cuenta de la vieja».

Producción total: Como mínimo, el 50 por ciento de la máxima posible.

Concluimos con una advertencia. Hasta aquí hemos hablado de productividad científica, pero no hemos entrado en los detalles de cómo evaluarla. Las políticas de investigación que proponemos en nuestro trabajo tienen el efecto de maximizar, a largo plazo, cualquier métrica que usemos para evaluar la ciencia. Pero, si elegimos una métrica errónea, como el número de artículos o el número de citas, podríamos acabar en una situación en la que casi toda la comunidad científica se desvive por publicar muchísimos artículos muy citados pero de baja calidad.

Cuenta la leyenda que la diosa Eos convenció a Zeus de que le concediera a su amante Titono la inmortalidad. Pero, por desgracia, Eos no pidió la juventud eterna, así que Titono acabó convertido en un anciano decrépito y arrugado. Esta historia nos enseña la importancia de elegir bien nuestras metas.

Y ahora les dejamos: tenemos que escribir un proyecto.

Miguel Navascués
y Costantino Budroni
investigan en el Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica de Viena.

PARA SABER MÁS

How should research be organised? Donald Gillies. College Publications, 2008.
Turn the scientific method on ourselves. Pierre Azoulay en *Nature*, vol. 484, págs. 31-32, abril de 2012.
To apply or not to apply: A survey analysis of grant writing costs and benefits. Ted von Hippel y Courtney von Hippel en *PLOS ONE*, vol. 10, art. e0118494, marzo de 2015.
Theoretical research without projects. Miguel Navascués y Costantino Budroni en *PLOS ONE* (*en prensa*). Disponible en **arxiv.org/abs/1810.11387**, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Quién financiará la próxima gran idea? David J. Kappos en *IyC*, diciembre de 2013.
La tiranía del factor de impacto. Reinhard Werner en *IyC*, marzo de 2015.
¿Quién debe financiar la investigación básica? Nathan Myhrvold en *IyC*, marzo de 2016.
Replantear la financiación. John P. A Ioannidis en *IyC*, diciembre de 2018.

GEOQUÍMICA

De las rocas a las biomoléculas

En el subsuelo marino se produce, sin ningún aporte orgánico, el aminoácido triptófano, un proceso que podría haber contribuido a la aparición de la vida en la Tierra

JOHN A. BAROSS

El poema «Fuego y hielo», de Robert Frost, pondera cuál de los dos elementos acabará con la vida en la Tierra. En contraste con esta idea, los científicos llevan mucho tiempo interesados en averiguar si la vida se originó en condiciones de calor o de frío. ¿Surgió en un medio volcánico, o bien, como planteó Charles Darwin en su correspondencia, en «algún charco de agua tibia»? ¿Fue necesario que hubiera hielo en el planeta o bastó con el fondo marino? Bénédicte Ménez, del Instituto de Física del Globo de París, y sus colaboradores han analizado un material rocoso extraído del subsuelo oceánico, bajo un campo de chimeneas serpentinizantes, que son manantiales hidrotermales de agua alcalina rica en gases. Han descubierto que allí tiene lugar una reacción química que podría haber abonado el terreno para la aparición de la vida: la síntesis de un aminoácido mediante un proceso no biológico.

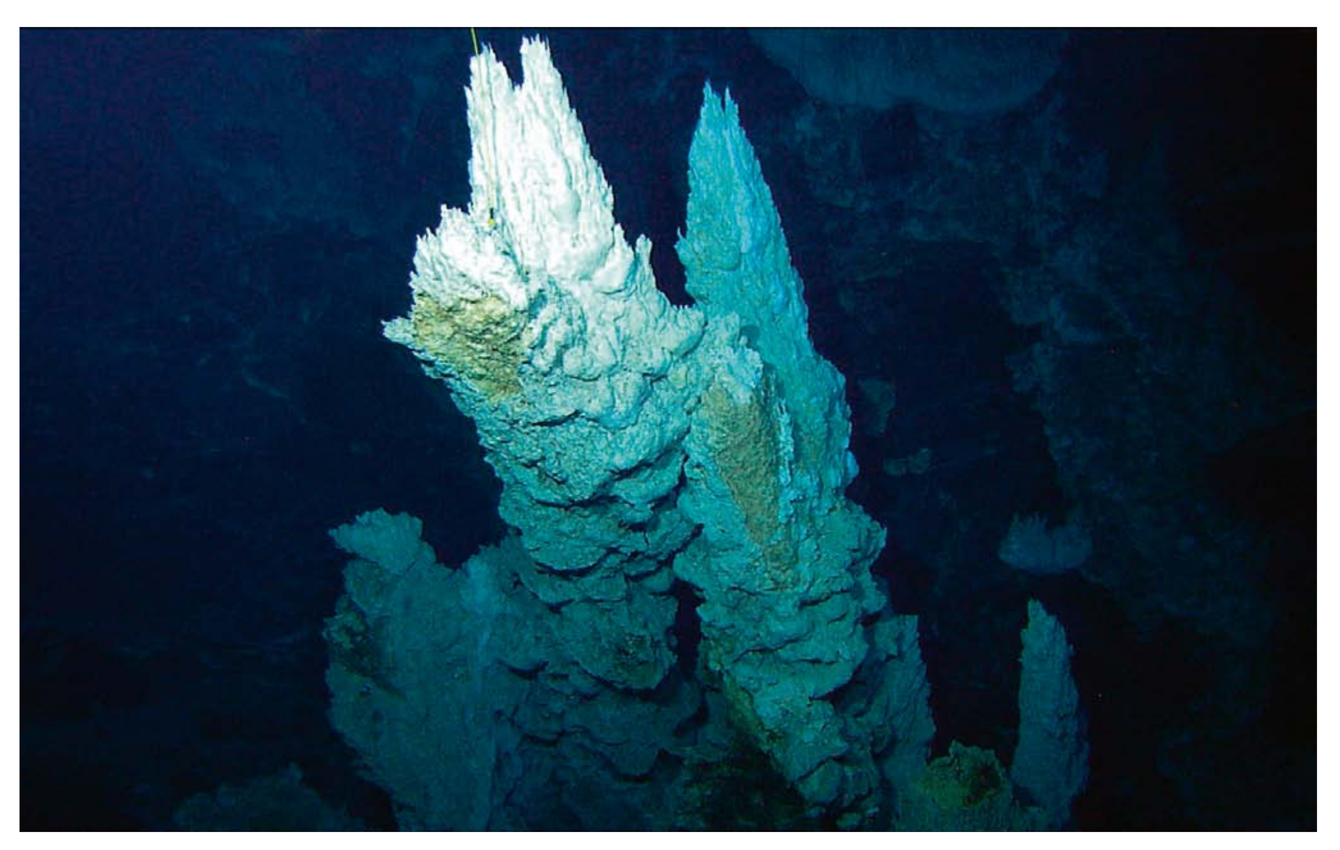
En las zonas volcánicas ricas en magma del lecho marino, existe un tipo de chimenea hidrotermal, denominada fumarola negra, cuyas características se conocen bien. De estas fumarolas emanan fluidos ácidos con altas concentraciones de gases y de metales en una forma químicamente reducida.

No obstante, en el año 2000, se descubrió por casualidad un campo hidrotermal en el Atlántico central, bautizado como Ciudad Perdida, compuesto por otro tipo de fumarolas. Estas se forman por serpentinización, una interacción química entre el agua y la peridotita, un tipo de roca que contiene minerales ricos en magnesio, hierro y silicio. La serpentinización genera condiciones alcalinas que contribuyen a la formación de grandes torres de carbonatos. También produce hidrógeno y diversas moléculas orgánicas, como formiatos, acetatos y piruvatos, que pueden ser importantes para sustentar las colonias microbianas de la Ciudad Perdida y que podrían haber servido en los procesos biológicos que dieron lugar a la vida en la Tierra. La Ciudad Perdida nos ha regalado una valiosísima colección de descubrimientos científicos que han cambiado notablemente nuestro conocimiento sobre las fumarolas hidrotermales y la historia geológica de la Tierra primigenia. Asimismo, nos ha permitido aventurar hipótesis comprobables sobre las circunstancias necesarias para que surja la vida.

Formación de aminoácidos

En los experimentos de laboratorio que simulan las condiciones propias de las fumarolas alojadas sobre el magma es posible sintetizar aminoácidos mediante reacciones químicas que no requieren elementos bióticos. No obstante, no se sabía si la síntesis abiótica de aminoácidos era viable en las fumarolas serpentinizantes. Se habían detectado aminoácidos en los fluidos que brotan de la Ciudad Perdida, pero no se conocía su origen.

Para indagar este asunto con más detalle, el equipo de Ménez analizó muestras de roca obtenidas mediante perforación a 170 metros por debajo del fondo marino de la Ciudad Perdida. Los autores exponen una gran cantidad de datos que demuestran la presencia de triptófano, un aminoácido que contiene nitrógeno, en un contexto donde es improbable que se formase por procesos biológicos. Los resultados obtenidos con tres técnicas de alta resolución son compatibles con la



BAJO LAS FORMACIONES CALCÁREAS de la Ciudad Perdida, en el Atlántico central, podrían darse las condiciones propicias para la aparición de la vida.

presencia de triptófano. También se han encontrado otros compuestos orgánicos que pueden ser productos intermedios de la síntesis de triptófano. Ménez y sus colaboradores proponen que esta síntesis podría ser consecuencia de reacciones de Friedel-Crafts, ya que han detectado la presencia de indol, una molécula orgánica que se genera cuando se sintetiza triptófano mediante dichas reacciones. Sus argumentos se ven reforzados por la ausencia de otros aminoácidos que estarían presentes si hubiese una fuente biológica, como podría ser la contaminación microbiana de las muestras de roca.

Para ampliar el trabajo del equipo de Ménez sobre la síntesis abiótica de triptófano, los próximos estudios que se lleven a cabo en la Ciudad Perdida deberían recoger suficiente volumen de líquido para determinar la quiralidad (una propiedad estructural) del triptófano. Las moléculas pueden existir en dos formas quirales, que son imagen especular una de otra. La síntesis abiótica de una molécula suele producir proporciones idénticas de las dos variantes, mientras que en la síntesis biológica de aminoácidos normalmente predomina una sobre la otra.

El trabajo de estos investigadores también aclara el misterioso mecanismo por el cual las moléculas de nitrógeno (N_2) se reducen a amoníaco en las fumarolas hidrotermales. La mayoría de las veces que se ha detectado amoníaco en estos entornos procedía de los sedimentos subterráneos de materia orgánica, y no de la síntesis abiótica de las fumarolas. El equipo de Ménez halló saponita, un mineral arcilloso que contiene hierro y que, según algunos estudios, cataliza la síntesis de compuestos orgánicos y la reducción de N_2 en amoníaco. Los autores sugieren que este mineral podría intervenir en la síntesis de triptófano. La generación abiótica de amoníaco, junto con la supuesta catálisis de aminas heterocíclicas, como el triptófano, también abre la posibilidad de la síntesis abiótica de otras aminas heterocíclicas: las pirimidinas y las purinas, que son componentes de los ácidos nucleicos ADN y ARN. Además, la saponita tiene la capacidad de favorecer la formación de polímeros orgánicos.

Condiciones favorables para la vida

La serpentinización tiene el potencial de sintetizar y acumular compuestos orgánicos que probablemente fueron importantes para que surgiera la vida, pero además posee otras dos características que tienen una intrigante trascendencia para el origen de la vida y el establecimiento de las condiciones de habitabilidad. La primera es que genera calor: el gradiente térmico puede superar los 200 grados centígrados en el lugar donde se produce la reacción. A su vez, este calor promueve la hidratación de la roca y su consiguiente expansión, que es la segunda característica curiosa de la serpentinización. Sin embargo, la serpentinización se invierte si, con el movimiento de las placas tectónicas, parte del fondo marino se hunde, por subducción, hacia el interior de la Tierra, ya que la temperatura y la presión aumentan en las profundidades subsuperficiales y el agua liberada por la roca puede contribuir al afloramiento de volcanes sobre el fondo oceánico. Todo ello, a su vez, podría ayudar a reciclar elementos fundamentales para la vida.

En el registro geológico de la época en la que se formó la Tierra, de entre 3500 y 4400 millones de años de antigüedad, abundan los minerales que contienen hierro y magnesio y otros elementos que

podrían haberse desprendido de la roca en un proceso mediado por aguas a altas temperaturas, lo cual apunta claramente a la presencia de actividad hidrotermal en aquella época. No obstante, durante los primeros 1000 millones de años, el manto estaba demasiado caliente para que hubiese tectónica de placas, de modo que el calor del interior de la Tierra se disipaba sobre todo a través de los volcanes situados en el fondo marino. La corteza debía de ser rica en silicatos y hierro, una situación que habría permitido una gran serpentinización y habría producido elevadas concentraciones de hidrógeno y compuestos orgánicos.

La extensa circulación de agua marina entre las rocas volcánicas durante aquella era podría haber generado el ascenso de calor, líquido y gas desde las profundidades. Se habrían creado así células de convección, que son corrientes impulsadas por las diferencias de densidad de los líquidos o los gases. En la roca volcánica, este fenómeno quizás comportó gradientes de temperatura, presión y composición química, además de ciclos de hidratación-deshidratación (que favorecen las reacciones inductoras de la polimerización de compuestos orgánicos). Con independencia de cómo surgiera la vida y del entorno primitivo en el que se asentó, la serpentinización probablemente desempeñó una función importante para que hubiese la cantidad necesaria de materia orgánica.

Las implicaciones científicas de estudiar la serpentinización en la Ciudad Perdida pueden tener un alcance todavía más amplio. Encélado, el satélite de Saturno, posee muchas de las propiedades químicas necesarias para la vida presentes en los medios serpentinizantes como la Ciudad Perdida. Haya o no haya habido nunca vida en Encélado —o en otras lunas heladas, como el satélite joviano Europa—, quizá logremos desentrañar los procesos geoquímicos que propician la aparición de la vida. En efecto, el análisis geoquímico respalda la hipótesis de que los sistemas hidrotermales tuvieron un papel fundamental en el origen de la vida. El trabajo de Ménez, igual que el de otros científicos que investigan las fumarolas hidrotermales, también es importante porque conocer mejor estos lugares puede ayudar a encontrar vida fuera del planeta Tierra. Un cuerpo planetario que posea tectónica de placas y sistemas hidrotermales tendrá más probabilidades de engendrar y sustentar vida basada en el carbono que otros sin dichas propiedades geofísicas. En ese caso, estudiar preferentemente estos planetas también incrementará nuestras posibilidades de encontrar vida.

John A. Baross *es profesor en la Facultad de Oceanografía y en el Programa de Astrobiología de la Universidad de Washington en Seattle.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 564, págs. 42-43, diciembre de 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Did life originate from a global chemical reactor? Eva E. Stüeken et al. en *Geobiology*, vol. 11, págs. 101-136, enero de 2013.
Sources of organic nitrogen at the serpentinite hosted Lost City hydrothermal field. Susan Q. Lang et al. en *Geobiology*, vol. 11, págs. 154-169, enero de 2013.
Abiotic synthesis of amino acids in the recesses of the oceanic lithosphere. Bénedicte Ménez et al. en *Nature*, vol. 564, págs. 59-63, noviembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Origen mineral de la vida. Robert M. Hazen en *IyC*, junio de 2001.
Geoquímica de los humeros blancos. Alexander S. Bradley en *IyC*, febrero de 2010.
Fuentes de vida. Martin J. Van Kranendonk, David W. Deamer y Tara Djokic en *IyC*, octubre de 2017.

VISIÓN

Las aves perciben los colores en categorías

Los humanos vemos los colores en categorías, como el rojo, e incluso distinguimos entre tonos de rojo, como el rubí o el carmesí. Ahora sabemos que las aves también cuentan con esa capacidad

ALMUT KELBER

La cantidad de información que captamos cada segundo con los órganos sensoriales resultaría abrumadora si no fuéramos capaces de clasificarla. La percepción del color es un buen ejemplo de este fenómeno. Cuando seleccionamos fresas, distinguimos sin problemas entre el color de la fruta todavía verde y la gran variedad de tonos de rojo que indica que la fresa está madura. Hace poco, Eleanor M. Caves, de la Universidad Duke, y sus colaboradores han revelado que el diamante mandarín (*Taeniopygia guttata*) percibe también una gama continua de colores como pertenecientes a distintas categorías, un fenómeno que repercute en su capacidad de diferenciar colores parecidos. Aunque podemos discernir con facilidad los diversos tonos que adquieren las fresas maduras, tendemos a agruparlos y considerarlos equivalentes. Al comparar colores con igual grado de separación entre ellos, nuestra capacidad de percibir diferencias entre los que se sitúan en dos categorías distintas, como el rojo y el naranja, es mayor que cuando pertenecen a una misma categoría. Esta mayor capacidad de distinguir colores de clases diferentes se denomina percepción categórica de los colores.

Con anterioridad ya se había confirmado que las aves cuentan con los requisitos para poder captar los colores en distintas categorías. Nuestros ojos y los de nuestros parientes más cercanos han evolucionado de forma que presentan tres tipos de conos retinianos sensibles al color. Las aves poseen cuatro y muestran una extraordinaria capacidad de discriminación de los colores, incluida la región ultravioleta del espectro. Un estudio anterior revelador realizado por C. D. Jones, de la Universidad de Sussex, había aportado pruebas fehacientes de que las aves pueden agrupar ciertos colores y dividir la serie cromática continua en categorías. La pregunta que seguía sin responder era si esa capacidad afectaba al



EL DIAMANTE MANDARÍN (*Taeniopygia guttata*) puede diferenciar entre colores parecidos, como los humanos. El hallazgo añade pruebas a las hipótesis que defienden que la percepción del color posee una base biológica y no cultural.

modo de percibir los colores semejantes y si les ayudaba a detectar diferencias importantes entre ellos. En su estudio, Caves y sus colaboradores examinaron si la capacidad de las aves de clasificar los colores repercute en su aptitud para diferenciarlos y si, por lo tanto, cuentan también con una percepción categórica de los colores.

Del rojo al naranja

Para ello, los autores crearon un ingenioso diseño experimental. Colocaron a hembras de diamante mandarín sobre un dispositivo con comida escondida bajo unos discos coloreados. El alimento solo se ubicaba bajo los discos bicolor, mientras que debajo de los de un solo color no había nada. Este experimento conductual permitió evaluar cuán bien podían detectar los pájaros las diferencias de color en virtud de su habilidad para localizar, en su búsqueda de alimento, los discos bicolor.

Los investigadores escogieron una gama continua de colores que se extendía del rojo al naranja, y los dividieron en ocho tonos con la misma separación de uno a otro. Recurriendo a modelos fisiológicos de visión cromática en las aves, centraron sus esfuerzos en conseguir que la separación de un tono al siguiente fuera la misma en la escala de gradaciones evaluada. La paleta cromática elegida es digna de atención porque el pico del diamante mandarín es, precisamente, rojo o naranja. El color del pico depende de la cantidad de astaxantina, un pigmento que se ha asociado en los pájaros con un sistema inmunitario saludable, por lo que estos colores pueden, a su vez, ser indicativos de la forma física del animal. Parece ser que las hembras distinguen no solo entre los machos con picos rojos o naranjas, sino también entre aquellos con picos de distintos tonos de rojo. Sin embargo, todavía se debate si la preferencia de las hembras por un macho u otro depende del color de su pico.

Caves y sus colaboradores expusieron primero a las hembras de diamante mandarín a pares de tonos contiguos de la escala de colores de ocho gradaciones y observaron que distinguían mejor entre dos tonos en concreto que entre cualquier otro par adyacente. Esto apunta a que existe una posible frontera categórica entre los tonos de rojo y naranja. Los autores investigaron entonces si los pájaros podían discriminar mejor entre pares de colores con un grado similar de separación situados a banda y banda de esta supuesta frontera, que entre pares de colores situados en el mismo lado. La conducta de los diamantes mandarín confirmó la hipótesis, lo que demuestra que poseen una percepción categórica de los colores.

¿Biología o cultura?

Los resultados del estudio resultan fascinantes por varios motivos. Las aves, además de los primates, son los únicos animales en los que se ha observado una percepción categórica de los colores. Se requieren más estudios que evalúen si otros aspectos relacionados con el color, como la intensidad o la pureza espectral, influyen también en la percepción categórica de las aves. También revestiría interés determinar si la capacidad del diamante mandarín de agrupar los colores en rojo o naranja desempeña alguna función en la elección de pareja. Con todo, puede resultar difícil de ponerlo a prueba, dado que las preferencias dependen de una serie de características del macho, como la proporción de conductas de cortejo que exhibe, y no solo del color del pico.

Este trabajo también tiene implicaciones en la comprensión de la percepción de los colores en nuestra especie. En la actualidad, existe la controversia sobre si el lenguaje, que recoge términos del color como rojo, azul, verde o amarillo, influye en la percepción cromática. Una corriente de pensamiento defiende que las categorías de los colores se asientan sobre una base cultural y lingüística. El signo distintivo de la percepción categórica (discriminación más rápida y precisa de los colores pertenecientes a categorías distintas) se advierte solo si el idioma de la persona evaluada posee una palabra para nombrar esas categorías de colores que se están comparando.

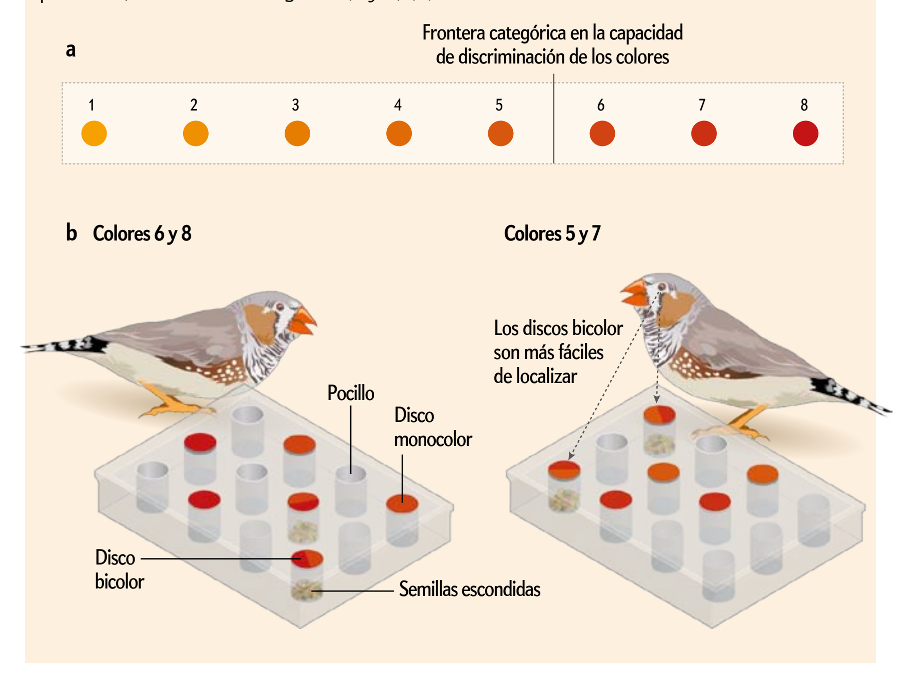
La otra corriente propugna que la percepción de los colores posee una base biológica que no depende de influencias culturales ni lingüísticas. Los indicios que respaldan este punto de vista incluyen la observación de que los nombres de colores específicos se ubican alrededor de los mismos tonos en diversos idiomas, así como el hecho de que los bebés diferencien entre el rojo, el verde, el azul, el amarillo y el morado antes incluso de haber aprendido las palabras que los describen. El hallazgo de Caves de que los pájaros perciben los colores en categorías añade más pruebas a favor de esta corriente.

¿Por qué puede ser importante la categorización y cómo encaja en el contexto más amplio de la percepción de las señales? El término percepción categórica fue acuñado para describir la capacidad de los humanos para captar los sonidos en unidades diferenciadas, llamadas fonemas, que ayudan a distinguir una palabra de otra (como los sonidos *d*, *t*, *b* y *p* en las palabras inglesas *bad*, *bat*, *pad* y *pat*). Otros animales, como las aves, también reconocen elementos similares a los fonemas. La percepción categórica podría describirse como un mecanismo que permite centrarse en las señales sensoriales relevantes cribándolas del enorme volumen de información sin valor. Según otra visión, los órganos sensoriales de los animales actuarían como filtros que detectan tan solo el tipo de información que encierra algún interés para el organismo. La combinación de estas dos tácticas podría facilitar a los animales el manejo de la ingente cantidad de estímulos sensoriales necesarios para fundamentar sus elecciones y conductas.

El nivel de contribución de cada uno de estos mecanismos y cómo ha evolucionado en los distintos clados animales son temas que merecen una mayor investigación. El trabajo de Caves y sus colaboradores con el diamante mandarín puede suponer el punto de partida de trabajos más ambiciosos sobre la posible percepción categórica de los colores en otros animales.

PERCEPCIÓN CATEGÓRICA DE LOS COLORES

LAS AVES perciben los colores de modo semejante a como lo hacen los humanos: agrupan los colores en categorías, y ello afecta a su capacidad de discriminación cromática, un fenómeno conocido como percepción categórica de los colores. Mediante experimentos se puso a prueba la capacidad del diamante mandarín (*Taeniopygia guttata*) para distinguir entre pares de colores contiguos de una escala de ocho tonos con la misma separación pertenecientes al espectro del naranja al rojo. Se observó que los pájaros mostraban una mayor capacidad de discriminar la pareja compuesta por los tonos 5 y 6 que cualquier otro par, lo que apunta a que se trata de una frontera categórica (*a*). A fin de evaluar si los pájaros disponen de una percepción categórica de los colores, estos se colocaron junto a un dispositivo diseñado para recompensar con comida su capacidad de diferenciar entre dos colores e identificar los discos bicolor. El dispositivo estaba compuesto por pocillos con semillas escondidas bajo discos bicolor y pocillos vacíos al descubierto, o bien tapados con discos monocolor con cada uno de los colores de los bicromáticos. Los pájaros fueron menos hábiles a la hora de identificar los discos bicolor cuando los dos tonos estaban situados a uno de los dos lados de la frontera categórica 5/6 (por ejemplo, los colores 6 y 8) que si los colores se ubicaban a banda y banda de esta frontera y pertenecían, por tanto, a diferentes categorías (5 y 7) (*b*).



Almut Kelber *trabaja en la Facultad de Biología de la Universidad de Lund.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 560, págs. 311-312, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Colour categorization by domestic chicks. C. D. Jones, D. Osorio y R. Baddeley en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 268, págs. 2077-2084, octubre de 2001.

Carotenoid modulation of immune function and sexual attractiveness in zebra finches. Jonathan D. Blount et al. en *Science*, vol. 300, n.º 5616, págs. 125-127, abril de 2003.

Categorical perception of colour signals in a songbird. Eleanor M. Caves et al. en *Nature*, vol. 560, págs. 365-367, agosto de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Evolución de la visión de los colores en los primates. Gerald H. Jacobs y Jeremy Nathans en *IyC*, junio de 2009.

¿Qué ven las aves? Timothy H. Goldsmith en *IyC*, septiembre de 2016.



BIOLOGÍA VEGETAL

Cuando las plantas hacen matemáticas

Espirales cruzadas, disposiciones regulares de hojas, proporciones áureas... Las plantas producen geometrías complejas que siguen fascinándonos. ¿Cuáles son los mecanismos biológicos que las generan?

Teva Vernoux, Christophe Godin y Fabrice Besnard



MATEMÁTICA VEGETAL: Las profusas hojas de *Aloe polyphylla*, una especie nativa de Sudáfrica, forman magníficas espirales. Hace tiempo que los biólogos intentan entender los procesos de autoorganización vegetal que dan lugar a tales formas geométricas.

Teva Vernoux es director de investigación del Centro Nacional para la Investigación Científica francés (CNRS) en el Laboratorio de Reproducción y Desarrollo de Plantas (RDP) de la Escuela Normal Superior de Lyon.

Christophe Godin es director de investigación del Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática francés (INRIA) en el RDP.

Fabrice Besnard es investigador asociado del INRIA en el RDP.

¿Quién no se ha sentido intrigado alguna vez por la belleza de las formas vegetales, por las regularidades y simetrías cuasicristalinas que dan lugar a lo que llamamos «filotaxis»? De las voces griegas *filo* («hoja») y *taxis* («orden»), la filotaxis denota la disposición de las hojas —y, por extensión, la de cualquier otro elemento vegetal— a lo largo de los tallos de una planta. Estas fascinantes estructuras han sido una fuente inagotable de inspiración en arte, desde las obras islámicas hasta las modernistas. Sin embargo, su interés no acaba ahí. Estas formas que nos brinda la biología exhiben sorprendentes propiedades matemáticas que solo hace poco hemos comenzado a descifrar.

Más allá de sus implicaciones en términos evolutivos, los mecanismos que aseguran la autoorganización de esas geometrías complejas han mantenido perplejos a los científicos durante largo tiempo. ¿Cómo emergen estas formas regulares desde el nivel molecular hasta la planta en su totalidad? ¿Cómo «calculan» las plantas? Durante más de doscientos años, los investigadores han empleado matemáticas, física, computación y biología para responder a esta cuestión. Sin embargo, ha sido solo en los últimos veinte años cuando han comenzado a obtenerse progresos significativos. Varios equipos interdisciplinares, incluido el nuestro, han formulado modelos que combinan los últimos avances en biología molecular con herramientas computacionales para diseccionar el funcionamiento de este sistema complejo.

Para iniciar esta historia, fijémonos en las pequeñas estructuras vegetales que, desde el tallo, son responsables de la filotaxis: los meristemos. Estos tejidos vegetales contienen células madre capaces de producir nuevos órganos de manera incesante. En este pequeño espacio, menor que la cabeza de un alfiler en muchas plantas, cada nuevo órgano se forma en el momento y lugar precisos. El crecimiento continuo del tallo y de los órganos dilata después esta disposición microscópica y genera los patrones filotáxicos que observamos a simple vista. Esta fase de alargamiento secundario de los órganos no suele producir ningún cambio reseñable en su colocación relativa. Por tanto, la filotaxis aparece muy pronto, en el mismo momento en que surgen los órganos en el meristemo. Pero ¿qué determina, en el interior de este tejido que apenas contiene cientos de células, el pequeño grupo de ellas que engendrarán el futuro órgano?



ESPIRALES ÁUREAS

Comencemos por fijarnos en la organización de los distintos patrones filotáxicos. El análisis de estas formas geométricas ha revelado propiedades sorprendentes. Los distintos tipos de filotaxis pueden clasificarse atendiendo a dos criterios: el número de elementos insertados en un nudo (es decir, en el mismo lugar del tallo) y el ángulo que subtienden dos elementos sucesivos. Ello permite definir varios tipos de filotaxis, como alterna, espiral, opuesta, combinada o verticilada.

Los estudios botánicos, aunque no precisamente exhaustivos, parecen indicar que las filotaxis espirales son las más comunes. De hecho, ha sido su estudio lo que ha impregnado la filotaxis de un aroma de esoterismo. Pueden distinguirse varios tipos de espirales. El primero liga los órganos en el orden en que fueron gestados en el tiempo, desde el más joven hasta el más viejo. A menudo poco visible, esta espiral generatriz se enrolla longitudinalmente alrededor del tallo, hoja tras hoja, como los escalones de una escalera de caracol.

Cuando las estructuras son muy compactas (imagine una escalera de caracol muy comprimida en su dirección longitudinal), como ocurre en las piñas de las coníferas, la proximidad de los elementos vecinos dibuja otras espirales. Claramente visibles, algunas de ellas giran en un sentido y otras en el opuesto. Si contamos cuántas espirales hay en sentido horario y cuántas en sentido antihorario, en la gran mayoría de las plantas encontraremos dos números no precisamente aleatorios, como ya señalara en 1831 el botánico alemán Alexander Braun: dos términos consecutivos de la famosa sucesión de Fibonacci. En esta secuencia, cada término se obtiene sumando los dos anteriores, comenzando con dos unos:

EN SÍNTESIS

A medida que crecen, las plantas pueden generar formas geométricas sorprendentemente regulares. Muchas de ellas guardan relación con la sucesión de Fibonacci y con el número áureo.

Existen algunos modelos matemáticos que describen buena parte de ese comportamiento. Sin embargo, hasta hace poco se ignoraban las bases moleculares que lo generan.

Esa situación ha comenzado a cambiar en los últimos años. Varios avances recientes sugieren que el desarrollo de las plantas podría no ser tan determinista como se pensaba.

Proporción áurea: ¿realidad o voluntarismo?

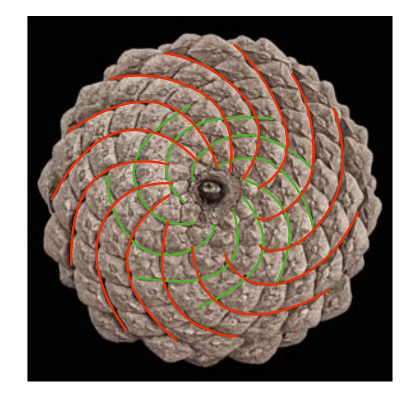
Las filotaxis espirales se han relacionado con la sucesión de Fibonacci de al menos dos maneras: a partir de las parejas de números obtenidos al contar las espirales que discurren en sentido horario y antihorario (*imágenes*) y mediante el «ángulo áureo» que caracteriza la disposición de dos órganos consecutivos. La presencia del número áureo se ha invocado en todo tipo de contextos, desde la arquitectura y la pintura hasta la astrología. También se ha acudido a este número para describir la geometría de las conchas de los nautilos o las relaciones de proporcionalidad entre diferentes partes del cuerpo humano.

Tales afirmaciones deben tomarse con precaución. En ocasiones, un análisis más cuidadoso sugiere que la proporción áurea aparece como consecuencia del redondeo de las verdaderas cifras, de delimitaciones arbitrarias o del sesgo de las medidas. Después de todo, ¿qué podría ser más fácil que encontrar una relación vagamente cercana a 1,6? Las diferencias con el valor correcto siempre pueden achacarse a la variabilidad biológica o a las incertidumbres en la medición. Lo mismo se aplica al ángulo de divergencia observado en la filotaxis: cuando se mide en la planta Arabidopsis thaliana, rara vez es igual a 137,5 grados. Pero, estadísticamente, su promedio se acerca a ese valor.

Por otro lado, los números que cuentan las estructuras espirales son enteros. En ellos el redondeo no tiene cabida y su correspondencia con los términos de la secuencia de Fibonacci no deja lugar a dudas. Hasta donde sabemos, este es el único ejemplo biológico que puede relacionarse de manera sólida con dicha sucesión y, como consecuencia, con el número áureo. Además, ese vínculo se ve reforzado por nuestro conocimiento sobre cómo se forman tales patrones. No obstante, en ocasiones se incurre en un sesgo a la hora de presentar la filotaxis: la atención se centra en las filotaxis espirales de Fibonacci y menos en otros tipos. Una de las cuestiones candentes de la investigación actual consiste justamente en explicar tantos patrones como sea posible, tanto por medio de la modelización como a partir de argumentos biológicos.



Esta margarita presenta una filotaxis espiral de tipo (21, 34). Sus flósculos dan lugar a 21 espirales en un sentido (*verde*) y a 34 en el opuesto (*rojo*). Tales números constituyen dos términos consecutivos de la sucesión de Fibonacci.



Esta piña tiene filotaxis espiral de tipo (8, 13). Las escamas dibujan 8 patrones espirales en un sentido (*verde*) y 13 en el otro (*rojo*). Una vez más, se trata de dos términos sucesivos de la sucesión de Fibonacci.

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55...

Por ejemplo, una piña suele mostrar 8 espirales en un sentido de giro y 13 en el otro; una margarita, 21 espirales en un sentido y 34 en el otro.

Identificada y estudiada por primera vez en el siglo XIII por Leonardo de Pisa, o Leonardo Fibonacci, esta sucesión exhibe varias propiedades matemáticas notables. En particular, si consideramos la secuencia que resulta de calcular el cociente entre dos términos sucesivos:

1/1, 2/1, 3/2, 5/3, 8/5, 13/8...

podremos comprobar que su límite converge a $(1 + \sqrt{5})/2$; es decir, el número áureo, Φ, aproximadamente igual a 1,618. Durante siglos, esta cantidad ha sido considerada una proporción armoniosa, incluso divina, en los tratados de arquitectura, dibujo o música.

En lo que respecta a las plantas, el número áureo se oculta también en el ángulo, relativamente constante, que forman dos órganos sucesivos en una filotaxis espiral. Dicho ángulo se aproxima a 137,5 grados. Recibe el apelativo de «áureo» ya que, si dividimos el ángulo conjugado (222,5 grados; es decir, el que hay que añadir para completar 360 grados) entre 137,5, obtenemos un valor muy próximo a la razón áurea. Los matemáticos de la antigua Grecia habrían concluido que 137,5 grados es el ángulo que divide la circunferencia de manera más armoniosa posible. De forma recíproca, puede demostrarse que, si generamos una disposición concéntrica de objetos separados por un ángulo cercano al ángulo áureo, aparecerán espirales secundarias cuya cantidad en cada sentido de giro vendrá dada por dos términos consecutivos de la sucesión de Fibonacci.

La presencia del ángulo áureo hace la filotaxis aún más intrigante. ¿Cómo determinan con tanta precisión las células de un tejido, el meristemo, el lugar donde se forma un nuevo órgano? ¿Y por qué aparece tan a menudo este número en el crecimiento de las plantas? Durante los siglos XIX y XX, ante la imposibilidad de observar con detalle lo que sucedía en el interior del meristemo, demasiado pequeño y bien protegido, se concibieron diferentes modelos para explicar la autoorganización y diversidad de los patrones filotáxicos. Y al igual que los astrónomos prenewtonianos idearon todo tipo de modelos sobre el movimiento de los cuerpos celestes, los investigadores han especulado sobre los mecanismos biológicos subyacentes a partir de observaciones y experimentos macroscópicos.

PRINCIPIO AUTOORGANIZADOR

Hoy sabemos que el ángulo que subtienden dos hojas consecutivas no está determinado genéticamente. En efecto, a menudo se observan filotaxis distintas dentro de una misma especie que no parecen poder heredarse. En algunos especímenes de girasol, por ejemplo, se han observado filotaxis espirales con un ángulo de divergencia cercano a 99,5 grados, en lugar de los 137,5 grados habituales, así como números de espirales secundarias asociados a la sucesión de Lucas, una variante de secuencia de Fibonacci. Tales alteraciones aparecen de manera espontánea, e incluso hay plantas que presentan filotaxis diferentes en sus distintas ramas, las cuales comparten los mismos genes. En algunos casos, un mismo meristemo cambia de filotaxis a lo largo de su vida.

Tales observaciones se vieron confirmadas en los años treinta del siglo pasado gracias a los experimentos de los británicos Mary y Robert Snow. Mediante manipulaciones microquirúrgicas, estos investigadores perturbaron el funcionamiento de los meristemos en varias plantas. En uno de sus ensayos clave, cortaron en dos el meristemo en la parte superior de los tallos de un epilobio (*Epilobium hirsutum*), una planta cuyas hojas se disponen en sentidos opuestos. Las dos mitades de los meristemos continuaron funcionando de manera independiente, pero esta vez con una filotaxis espiral. Aquel resultado sugería que el ángulo de divergencia no era intrínseco a la planta. Al mismo tiempo, apuntaba a la existencia de un mismo mecanismo responsable de las distintas filotaxis.

Esos y otros experimentos llevaron gradualmente a la hipótesis de que eran las interacciones entre los órganos las que, sumadas a las condiciones iniciales (el número y la posición de los órganos ya existentes en el momento en que se forma uno nuevo), generaban un patrón determinado. En general, el principio subyacente puede resumirse con una regla sencilla: en el meristemo, un órgano se forma en el momento y en el lugar en el que el crecimiento de la planta le deja sitio suficiente.

Durante la segunda mitad del siglo XX, varios investigadores exploraron el potencial de este principio autoorganizador. Se desarrollaron numerosos modelos tisulares y de formación de órganos, los cuales condujeron a la identificación de un precepto común a todos los sistemas filotáxicos: los órganos recién creados generan a su alrededor una señal inhibidora, lo que suprime la formación de nuevos órganos en sus inmediaciones. La superposición de esas señales crea en la superficie del meristemo un «campo de inhibición», el cual determina el momento y el lugar de crecimiento de los nuevos órganos.

UN MODELO UNIFICADO

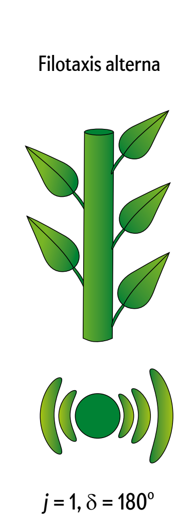
A partir de ahí, a principios de los años noventa, Yves Couder y Stéphane Douady, de la Escuela Normal Superior de París, desarrollaron un modelo físico de la filotaxis. Estos investigadores observaron que las gotas de un fluido metálico colocadas en un campo magnético reproducían, al repelerse y alejarse del centro, los principales tipos de filotaxis. Después, a partir de este comportamiento, desarrollaron un modelo matemático que pretendía sintetizar y unificar las modelizaciones previas. En él, el meristemo en crecimiento es considerado un sistema dinámico determinista. Su trabajo confirmó que era posible generar ángulos de divergencia muy precisos sin haberlos fijado de antemano: el ángulo entre dos órganos consecutivos, así como el tiempo de generación entre ellos, resultaron ser propiedades emergentes de los mecanismos de inhibición y de crecimiento de la planta.

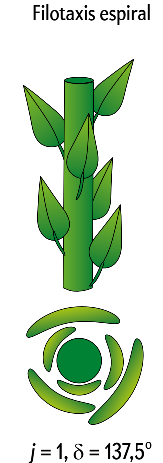
Con todo, la mayor virtud del modelo residía en su poder explicativo. Un solo mecanismo permitía reproducir todas las filotaxis observadas, desde los tipos principales hasta otros más exóticos, así como las transiciones naturales entre filotaxis e incluso algunos experimentos de perturbación del crecimiento, como los de Mary y Robert Snow. En este modelo, la aparición del patrón de filotaxis queda determinada por un solo «parámetro de control» geométrico, $\Gamma = d/R$, donde d es el alcance del campo inhibidor de cada órgano, y R denota el radio de la zona central del meristemo, donde ningún órgano puede formarse.

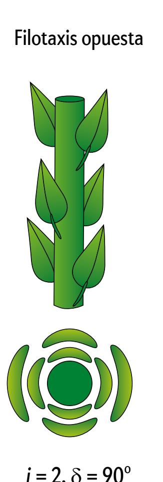
Al comienzo del crecimiento, el meristemo es pequeño, por lo que R también lo es y el parámetro Γ toma un valor elevado. El primer órgano creará en el meristemo un amplio campo de inhibición. Como consecuencia, lo más probable será que el siguiente órgano aparezca en el lado opuesto; es decir, a 180 grados. Después el meristemo crecerá, R aumentará y Γ se reducirá. El siguiente órgano no podrá aparecer exactamente a 180 grados del anterior, ya que aún experimentará la influencia del campo inhibidor del primero, al menos si el crecimiento no es demasiado rápido. Como consecuencia, aparecerá a un ángulo ligeramente inferior a 180 grados.

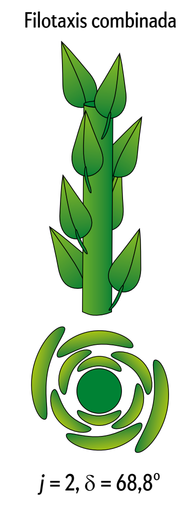
Es posible demostrar que, a medida que el crecimiento continúa y el parámetro de control Γ disminuye, los siguientes órganos aparecerán en ángulos dados por

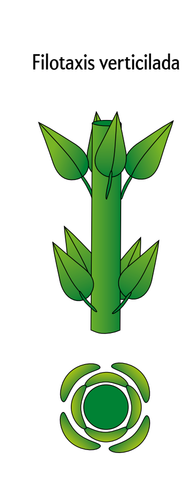
TIPOS DE FILOTAXIS: Las estructuras ordenadas que forman las hojas u otros órganos vegetales reciben el nombre de «filotaxis». Los diferentes tipos pueden clasificarse según el número de órganos insertados en un mismo nodo (j), así como según el ángulo de divergencia entre dos órganos sucesivos (δ). En la filotaxis espiral, el ángulo correspondiente queda determinado por la proporción áurea.











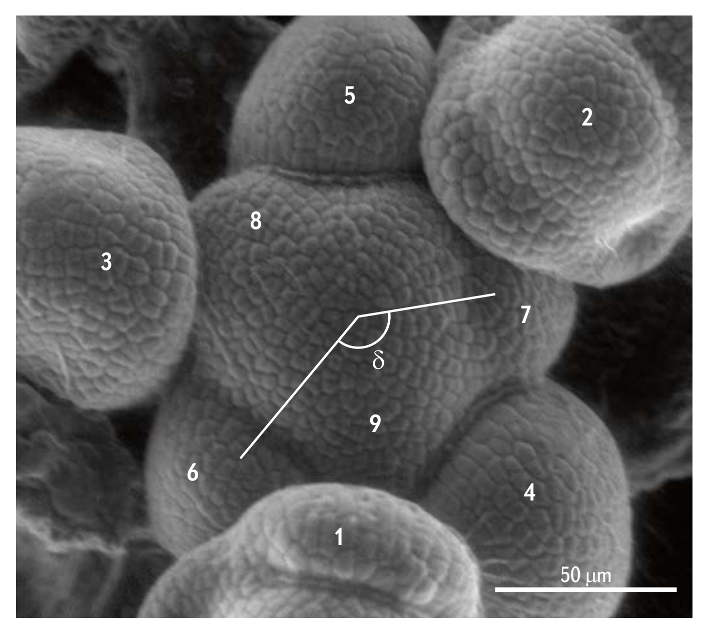
CORTESÍA DE F. BESNARD

Meristemos y ángulo áureo

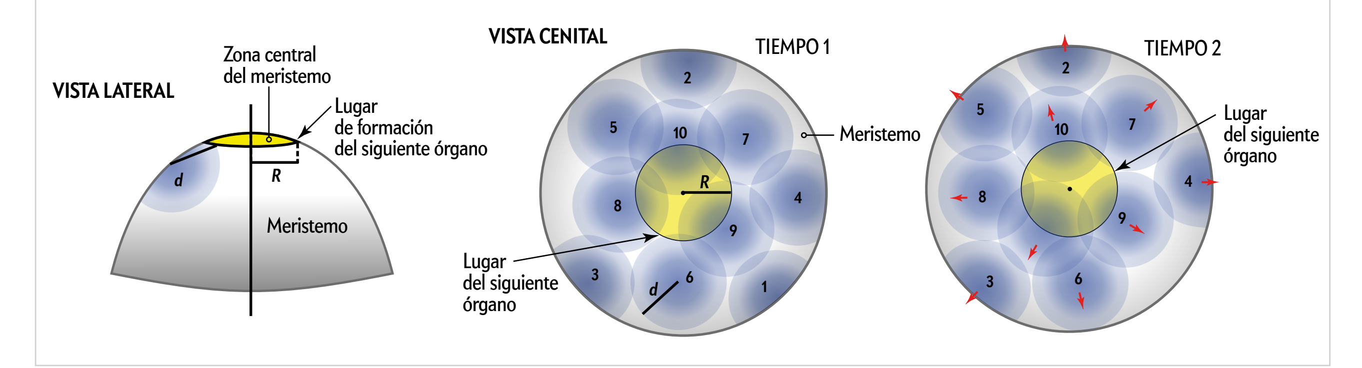
En una planta, los meristemos son los pequeños grupos de células indiferenciadas a partir de las cuales se forman los nuevos órganos, como las hojas (*fotografía*). En una filotaxis espiral, el ángulo que forman dos órganos sucesivos vale en promedio unos 137,5 grados, un resultado muy cercano al «ángulo áureo». Dicho nombre se debe a que genera una división de la circunferencia que respeta la proporción áurea, $\Phi \approx 1{,}618$:

$$360 = 137{,}5 + 222{,}5$$
$$360/222{,}5 \approx 222{,}5/137{,}5 \approx \Phi$$

La aparición del número áureo en este tipo de estructuras puede explicarse mediante un modelo de crecimiento (*esquema*) en el que cada nuevo órgano genera a su alrededor un «campo inhibidor» de radio *d* (*azul*) que impide la formación de nuevos órganos en esa zona. Al mismo tiempo, tampoco se permite el nacimiento de órganos en una región de radio *R* situada en la zona central del meristemo (*amarillo*). Entre otras propiedades, este modelo implica que cada nuevo órgano aparecerá en el borde de la zona central, donde la resultante de los campos inhibidores es más débil. A medida que la planta crece, dichos campos van alejándose del centro.



En la filotaxis espiral, la formación de dos órganos sucesivos en el meristemo tiene lugar con una separación angular de unos δ = 137,5 grados. Tanto en esta fotografía como en el esquema, los números indican el orden de formación de cada órgano, del más viejo al más joven.



$$(1 - 1/b)360^{\circ},$$

donde b es un elemento de la sucesión de cocientes de Fibonacci. Dado que esta secuencia converge al número áureo, Φ, el ángulo de divergencia tenderá a

$$(1 - 1/\Phi)360^{\circ},$$

que no es otro que el ángulo áureo. Por tanto, este ángulo aparece en las plantas debido a dos razones: la dinámica de crecimiento, que hace que el parámetro Γ disminuya, y las propiedades geométricas del desarrollo de los meristemos, que provocan que el ángulo de divergencia tome valores que tienden al número áureo.

A finales del siglo xx, la comunidad científica aceptó este principio geométrico determinista, basado en la inhibición entre órganos jóvenes, como el mecanismo que explicaba buena parte de las distintas filotaxis —espirales o no— observadas en las plantas. Pero, según este modelo, las plantas no «calculan» nada en sentido estricto, sino que se limitan a disponer sus órganos según la fórmula de Douady y Couder. Sus propiedades matemáticas no serían más que una consecuencia indirecta, aunque sorprendente desde el punto de vista estético, de dicho proceso de autoorganización.

HORMONAS DE CRECIMIENTO

El modelo geométrico determinista de la filotaxis se basa en reglas relativamente simples: un centro que no puede producir órganos, órganos que inhiben la formación de otros nuevos en sus inmediaciones, y un alejamiento gradual del centro de los órganos así creados. Pero esta simplicidad supone un desafío para los biólogos: ¿cómo implementan las plantas estas reglas «simples»? Y en particular, ¿cuál es la naturaleza de los campos inhibidores? Aunque aún persisten numerosas preguntas, los últimos años han visto grandes avances al respecto. Ello se ha debido, sobre todo, al estudio de la formación de flores en *Arabidopsis thaliana*, una mala hierba fácil de cultivar en el laboratorio.

Paradójicamente, la búsqueda de una señal inhibidora comenzó con el descubrimiento del agente opuesto: un activador. En el año 2000, el investigador de la Universidad de Berna Cris Kuhlemeier y sus colaboradores demostraron que, en el berro y en el tomate, el transporte de una hormona vegetal, la auxina, era necesario para la formación de nuevos órganos. Hace tiempo que sabemos que esta hormona se desplaza en las plantas gracias a los transportadores de membrana, moléculas que la ayudan a atravesar la pared celular. Kuhlemeier y su equipo demostraron que, si se suprimía ese transporte, las flores dejaban de formarse en la arabidopsis. Sin embargo, al aplicar localmente auxina a una planta cuyo transporte se hallaba anulado, volvía a surgir una flor.

Aquel experimento sugirió que el transporte de auxina causaba una acumulación local de esta hormona, necesaria para la formación de un órgano. Pero ¿qué ocurría con los campos inhibidores? El experimento de Kuhlemeier también proporcionó una pista: para suprimir la formación de un órgano en un determinado lugar, podía bastar con impedir la acumulación de auxina en esa zona. ¿Y si las flores en formación concentraran la auxina de manera tan eficiente que privaran a las células vecinas de esta hormona?

A fin de poner a prueba esta hipótesis con células observadas al microscopio, varios equipos de todo el mundo han combinado estudios biológicos y simulaciones por ordenador. Los resultados indican que tanto el diseño de la red de transportadores de auxina como su dinámica resultan compatibles con los modelos en los que las flores en formación acumulan auxina, al tiempo que privan de ella a las zonas vecinas. Además, muestran que el área central del meristemo es insensible a la auxina. Todos estos fenómenos tienen lugar en la epidermis, la capa celular más externa de la planta. Para deshacerse con rapidez del exceso de auxina, los órganos jóvenes disipan la hormona acumulada en los tejidos internos gracias a la construcción temprana de un sistema vascular. A medida que crecen, las flores se separan del meristemo y dejan de competir por la auxina con los órganos más jóvenes. Este modelo molecular se ha confirmado desde entonces con otras plantas evolutivamente alejadas de la arabidopsis, como el tomate, el maíz o la cebada.

Así pues, puede que una sola molécula desempeñe el papel tanto de activador como de supresor del crecimiento. ¿Resuelve ello el misterio de los campos inhibidores? La realidad es más compleja. En concreto, desconocemos qué mecanismo molecular permite que los transportadores se orienten correctamente en

FUNCIÓN BIOLÓGICA

¿Se debe la filotaxis a una adaptación evolutiva?

¿Para qué sirve la filotaxis? En el contexto de la teoría de la evolución, la pregunta puede reformularse de la siguiente manera: ¿proporciona la filotaxis alguna ventaja adaptativa? Hoy por hoy, carecemos de una respuesta concluyente. Con todo, hemos de ser precavidos con la tendencia espontánea a considerar todo elemento biológico como fruto de una selección positiva *ad hoc*.

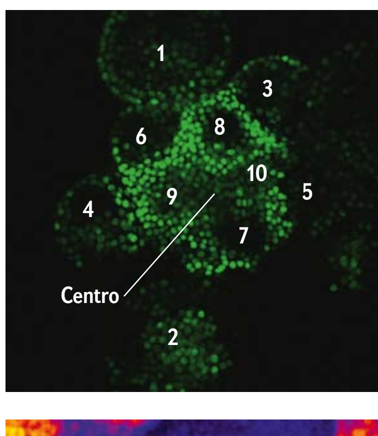
Una explicación habitual sostiene que la filotaxis obedecería a una adaptación para captar más luz, ya que minimizaría la superposición entre las hojas. Sin embargo, esta afirmación no resiste un análisis minucioso. En primer lugar, pasa por alto la diversidad de las filotaxis existentes; en concreto, el hecho de que numerosas plantas presentan filotaxis con notables superposiciones. Además, en lo que respecta a las hojas, la filotaxis solo determina su lugar de inserción en el tallo, pero a menudo las hojas se reorientan debido a los movimientos de crecimiento, flexión o torsión mecánica para captar más luz. Por otro lado, no todas las plantas adquieren una ventaja maximizando su exposición al sol, especialmente las que viven en ambientes áridos. Hasta donde sabemos, aún no se ha establecido una correlación entre la tasa de recubrimiento que otorga la filotaxis y la tasa de insolación que reciben las plantas. Por último, este argumento ignora la naturaleza de las estructuras implicadas. La filotaxis no solo concierne a las hojas, sino a muchas otras estructuras vegetales no fotosintéticas y para las que una iluminación máxima es irrelevante: escamas de piñas, flósculos (pequeñas flores) y otros órganos.

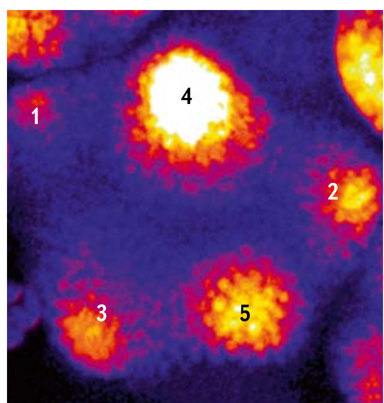
Aparte de optimizar la captación de luz, se han propuesto otras ventajas adaptativas de la filotaxis. Por ejemplo, ya en 1873, el médico inglés Hubert Airy sugirió que una estructuración compacta protegería a los órganos más jóvenes de la planta del estrés externo (temperatura, lesiones, depredación, etcétera). Aunque revisten interés, estas hipótesis adolecen de un problema importante: resultan complicadas de verificar experimentalmente, ya que es difícil comparar distintas filotaxis o modificarlas sin alterar otras características de la planta. Ello al margen de que, en general, medir de manera rigurosa las ventajas selectivas nunca es sencillo.

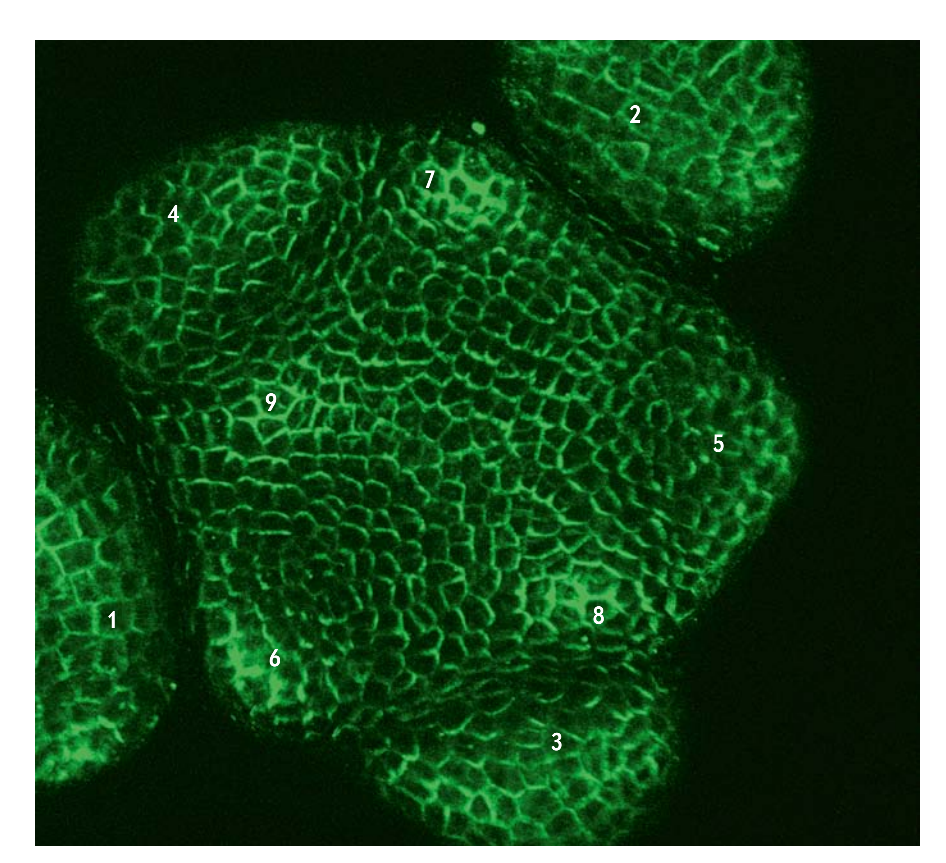
Una alternativa a estas hipótesis adaptacionistas postula que los patrones geométricos de la filotaxis no serían más que una consecuencia indirecta del desarrollo de la planta, el cual sí constituiría el proceso que se ve sometido a selección. El modo en que las plantas generan sus órganos da cuenta de muchas de las propiedades geométricas de la filotaxis. Por supuesto, esta explicación no excluye que tales propiedades emergentes puedan conferir una ventaja adaptativa particular, lo que en última instancia favorecería la selección de los mecanismos que controlan la formación de órganos.



Aunque se ha propuesto que la filotaxis maximiza la captación de luz, muy a menudo no ocurre así. Tal es el caso de este arbusto del género *Hebe*, con una filotaxis verticilada muy compacta que no aumenta la exposición al sol.







LAS MOLÉCULAS DE LA FILOTAXIS: En el meristemo, son varias las moléculas que determinan dónde y cuándo aparecerá el siguiente órgano (*los números indican el orden de gestación de cada uno*). Una hormona, la auxina, se acumula en los órganos en formación (*izquierda, arriba*). Ello es posible gracias a los transportadores de membrana, proteínas que ayudan a la auxina a atravesar la pared celular (*derecha*). Al acumularse en un órgano naciente, las zonas vecinas quedan privadas de esta hormona. Por último, otra proteína, la AHP6, también se acumula en los sitios donde crecerán los futuros órganos (*izquierda, abajo*). En concentración suficiente, esta molécula inhibe la acumulación de otra hormona, la citocinina, que promueve la división celular. En conjunto, los procesos que inducen estas moléculas hacen que los órganos de la planta se generen uno tras otro.

CORTESÍA DE F. BESNARD (*abajo a la izquierda y derecha*); CORTESÍA DE T. VERNOUX ET AL. EN *MOL. SYST. BIOL.*, VOL. 7, ART. 508, 2011 (*arriba a la izquierda*)

las células para acumular o disipar la auxina. Al respecto existen varias hipótesis. ¿Se orientan los transportadores hacia la célula que presenta una mayor concentración de auxina? ¿O se orientan para maximizar el flujo de esta hormona? Sabemos que los campos inhibidores corresponden a zonas de baja concentración de auxina creadas por los transportadores. Sin embargo, ignoramos qué mecanismos determinan el comportamiento de los transportadores.

¿UNA SEÑAL MECÁNICA?

La señal química proporcionada por la auxina puede que se vea asistida por una señal mecánica. De hecho, rodeadas por una pared rígida, las células vegetales experimentan la presión del agua que almacenan. Además, la forma de los tejidos genera tensiones locales que modifican el comportamiento de las moléculas del citoesqueleto, grandes polímeros que controlan la mecánica y la arquitectura de las células. Y a medida que el tejido crece y se deforma, las células y su citoesqueleto responden a las nuevas tensiones alterando las propiedades de las paredes celulares (su rigidez y dirección de crecimiento), que, a su vez, modifican las fuerzas mecánicas. De esta manera, del tejido en crecimiento emergen campos mecánicos complejos. ¿Proporcionan estos la información necesaria para posicionar los nuevos órganos? Aunque la existencia de un vínculo directo de este tipo aún no se ha demostrado, la mecánica celular sí parece intervenir de manera indirecta en el crecimiento de la arabidopsis.

En primer lugar, nuestro laboratorio ha demostrado que las fuerzas mecánicas influyen en la orientación de los transportadores de auxina. Por otro lado, gracias al estudio de mutantes, al análisis de alteraciones genéticas específicas y a la monitorización precisa del crecimiento mediante microscopía, varios equipos han hallado que la acumulación local de auxina promueve la síntesis de compuestos que ablandan la pared celular, lo que favorece el crecimiento de las células. Todos estos acontecimientos probablemente resulten esenciales para desencadenar el crecimiento de la hoja o de la flor.

¿Bastan esas dos señales? Uno de nuestros descubrimientos recientes lo ha puesto en duda: tras una larga búsqueda, finalmente hallamos un inhibidor que se difunde alrededor de los órganos en formación. Se trata de AHP6, una pequeña molécula que, cuando se encuentra en la concentración suficiente, inhibe la actividad de otra hormona vegetal, la citocinina, la cual promueve la división celular. Sorprendentemente, el campo producido por AHP6 no altera el ángulo entre dos órganos, pero sí impone un ritmo regular en el crecimiento, de modo que la aparición de dos órganos sucesivos queda bien separada en el tiempo. A su vez, ello conduce a una disposición más regular de las flores a lo largo del tallo.

La imagen que emerge de todo lo anterior es la de un campo inhibidor que consta de varias componentes. La distribución de auxina constituye el elemento central, pero este coexiste con otros factores que contribuyen a su robustez. ¿Por qué la auxina no es

el único productor del campo inhibidor? Esta pregunta, aún sin respuesta, constituye una de las líneas actuales de investigación.

Sin embargo, la investigación sobre la naturaleza de los campos inhibidores ha dejado de lado otros aspectos. ¿Qué factores aseguran un crecimiento continuo? ¿Por qué no pueden formarse los órganos en el centro del meristemo, incluso si, como hemos demostrado, la auxina se acumula allí? ¿Qué es lo que causa la variación del parámetro de control predicho por los modelos deterministas? ¿Solo del crecimiento de la planta, como se supone, o hay otro mecanismo más específico? Las respuestas dispares obtenidas hasta ahora dificultan la formulación de un modelo molecular unificado.

Es también posible que los modelos deterministas sean insuficientes para describir la filotaxis. En nuestros estudios sobre la filotaxis espiral en *Arabidopsis thaliana*, hemos observado variaciones que no se corresponden con las predicciones del modelo geométrico determinista. En concreto, el ángulo de divergencia se aleja del ángulo áureo cuando se mide a lo largo de los tallos. Tales variaciones no son ruido aleatorio, sino que presentan una estructura muy llamativa. Su estudio estadístico, junto con la observación de la formación de órganos en tiempo real, indica que corresponden a órganos que se forman al mismo tiempo y cuyo orden se intercambia ocasionalmente a lo largo del tallo.

NUEVOS MECANISMOS

La filotaxis de los musgos

Una vía alternativa para entender la geometría de las plantas

YOAN COUDERT

¿Y si nos replanteamos la cuestión de la filotaxis desde el principio? Pensemos en una línea de investigación que persiguiera el mismo objetivo (entender la filotaxis), pero que se centrase en una planta que funciona de forma completamente distinta a las estudiadas hasta ahora.

Tales plantas son los musgos, un grupo vegetal que apareció hace entre 440 y 340 millones de años y que, por tanto, es mucho más antiguo que las plantas con flores como la arabidopsis, las cuales se originaron hace entre 245 y 200 millones de años. El ancestro común de estos dos grupos probablemente careciese de hojas. Este órgano habría aparecido de forma independiente y se habría mantenido durante la evolución de ambos tipos de plantas, ya que habría aportado una solución óptima para la captación de luz durante la fotosíntesis. Estamos hablando de un proceso de evolución convergente de las formas. Pero el parecido no se detiene ahí. También los musgos presentan sus hojas repartidas de manera uniforme alrededor de un tallo. La diferencia reside en que el meristemo que las produce está formado por una sola célula, en vez de los cientos de ellas que componen los meristemos de las plantas con flores.

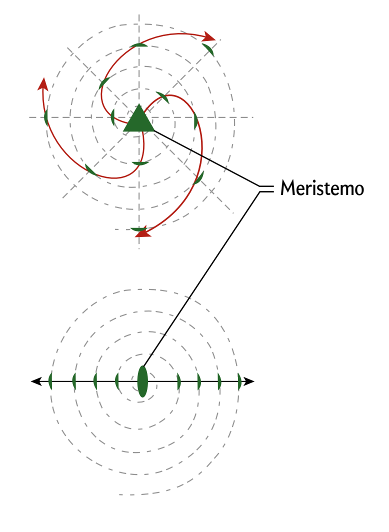
Cada vez que esta célula se divide, una de las dos células resultantes se convertirá en una hoja; la otra permanecerá como meristemo en la punta del tallo. La disposición de las hojas, por tanto, estará determinada principalmente por la forma de la célula meristemática y por la posición del plano de división. Al igual que en las plantas con flores, el ritmo de producción de las hojas conduce a una filotaxis muy regular, la cual puede ser espiral o «dística» (con las hojas dispuestas en los dos sentidos de una misma recta, *figuras*).

Si comparamos los campos inhibidores de las plantas con flores con el proceso de división celular de los musgos, queda patente que se trata de mecanismos muy distintos. Sin embargo, ¿podría ocurrir que las señales moleculares que controlan la filotaxis en las primeras desempeñaran un papel en los segundos? No en vano, tanto la auxina como las citocininas se encuentran también en los musgos. Ante un repertorio limitado de moléculas de señalización, las plantas las han «reciclado» constantemente en el curso de la evolución. La auxina posiblemente se halle en el meristemo de los musgos, y puede que su transporte hacia las hojas por medio de transportadores de membrana, también existentes en estas plantas, resulte necesario para su funcionamiento.

Se ha demostrado que la acumulación de auxina en ausencia de transportadores de membrana bloquea la formación de las hojas. Sin embargo, se desconoce qué función desempeña esta interacción en la manera en que se organizan las hojas alrededor del tallo. Por su parte, las citocininas regulan la proliferación celular y el nacimiento del tallo en los musgos. Pero, de nuevo, desconocemos su papel exacto en la filotaxis. Hoy por hoy, aún quedan numerosos aspectos por explorar para entender cómo plantas tan alejadas evolutivamente entre sí pueden acabar mostrando una apariencia similar.

Yoan Coudert *investiga en el Laboratorio de Reproducción y Desarrollo de Plantas de la Escuela Normal Superiorde Lyon.*





En los musgos, el meristemo que genera las hojas consta de una sola célula. Según su forma y proceso de división, las hojas pueden dar lugar a una filotaxis espiral, como en *Polytrichum commune* (*arriba*), o dística, como en *Fissidens taxifolius* (*abajo*).

Tales permutaciones son relativamente comunes en *Arabidopsis thaliana*. En la naturaleza, se observan con facilidad en plantas que, como dicha especie, poseen un tallo alargado que separa los elementos botánicos. Y aunque es posible reproducir este tipo de comportamiento en el modelo determinista, las permutaciones nunca alcanzan la intensidad ni la complejidad observadas en las plantas reales.

EL PAPEL DEL AZAR

¿Cómo modificar el modelo determinista para dar cabida a esas desviaciones? En este, el valor local del campo inhibidor determina si se formará un órgano o no. En cada paso de tiempo y para cualquier posición en el meristemo, puede calcularse si el campo generado por los órganos vecinos suprimirá el crecimiento de un nuevo órgano en función de si supera o no cierto umbral. Sin embargo, cada vez más estudios indican que el proceso que inicia la formación de un órgano no es tan determinista. A la vista de ello, hemos desarrollado un modelo que mantiene los aspectos geométricos del anterior, pero en el que el mecanismo desencadenante es probabilístico.

En él, un órgano se produce de acuerdo con una probabilidad que depende del nivel de inhibición (intensidad y tiempo de exposición) que las células perciben localmente. La introducción de esta nueva hipótesis permite reproducir con mayor fidelidad las permutaciones advertidas en *Arabidopsis thaliana*. Además, hemos derivado nuevos parámetros de control relacionados con varias propiedades observables, como la geometría de la filotaxis, el número de permutaciones o el intervalo temporal entre la formación de órganos.

Este nuevo modelo estocástico también nos ha permitido rastrear propiedades aún no observables, como la sensibilidad de las células a los campos inhibidores. En particular, sugiere que la percepción de señales por parte de las células constituye un factor importante a la hora de explicar los patrones filotáxicos. Y, como cualquier modelo, ofrece un marco para proponer nuevos experimentos y poner a prueba su validez.

Al respecto, un primer desafío pasa por medir con rapidez y precisión varios parámetros macroscópicos de la arquitectura de una planta. Ya sea para respaldar estadísticamente los resultados o para distinguir los efectos de diferentes genes, ello implica observar un gran número de plantas. Sin embargo, hoy por hoy no resulta posible medir en muchos ejemplares parámetros como el ángulo de divergencia, el número de permutaciones, el tamaño de los tallos o el tiempo entre la formación de dos órganos. A tal fin, se están desarrollando métodos de automatización para llevar a cabo tales mediciones, esenciales para lograr el salto de lo cualitativo a lo cuantitativo en el estudio de la filotaxis.

Un segundo reto consiste en relacionar los parámetros de control de los modelos con datos moleculares o celulares que puedan determinarse experimentalmente. ¿Cuál es el tamaño de un campo inhibidor? ¿Y el de la zona central del meristemo en la que no puede formarse ningún órgano? En este caso, la dificultad se debe a que tales parámetros no son necesariamente morfológicos —y accesibles, por tanto, a la simple observación—, sino funcionales, lo que exige un conocimiento mínimo de sus bases moleculares. Por ejemplo, si los campos inhibidores se hallan asociados a concentraciones de auxina en el meristemo, bastaría con estudiar su evolución a lo largo del tiempo para deducir la dinámica de los campos.

Hasta hace poco, no había manera de medir con la precisión requerida y a escala celular los niveles de hormonas en el meristemo. En 2012, sin embargo, nuestro equipo logró superar este obstáculo con un nuevo biosensor que, gracias a una proteína fluorescente sensible a la concentración de auxina, consigue revelar la cantidad de esta hormona que perciben las células. Al acoplar este biosensor con otros marcadores de la actividad y la diferenciación celular, es posible seguir la dinámica espacial y temporal de la señal y la autoorganización del meristemo. Frente a los modelos computacionales, la biología molecular no ha dicho aun su última palabra.



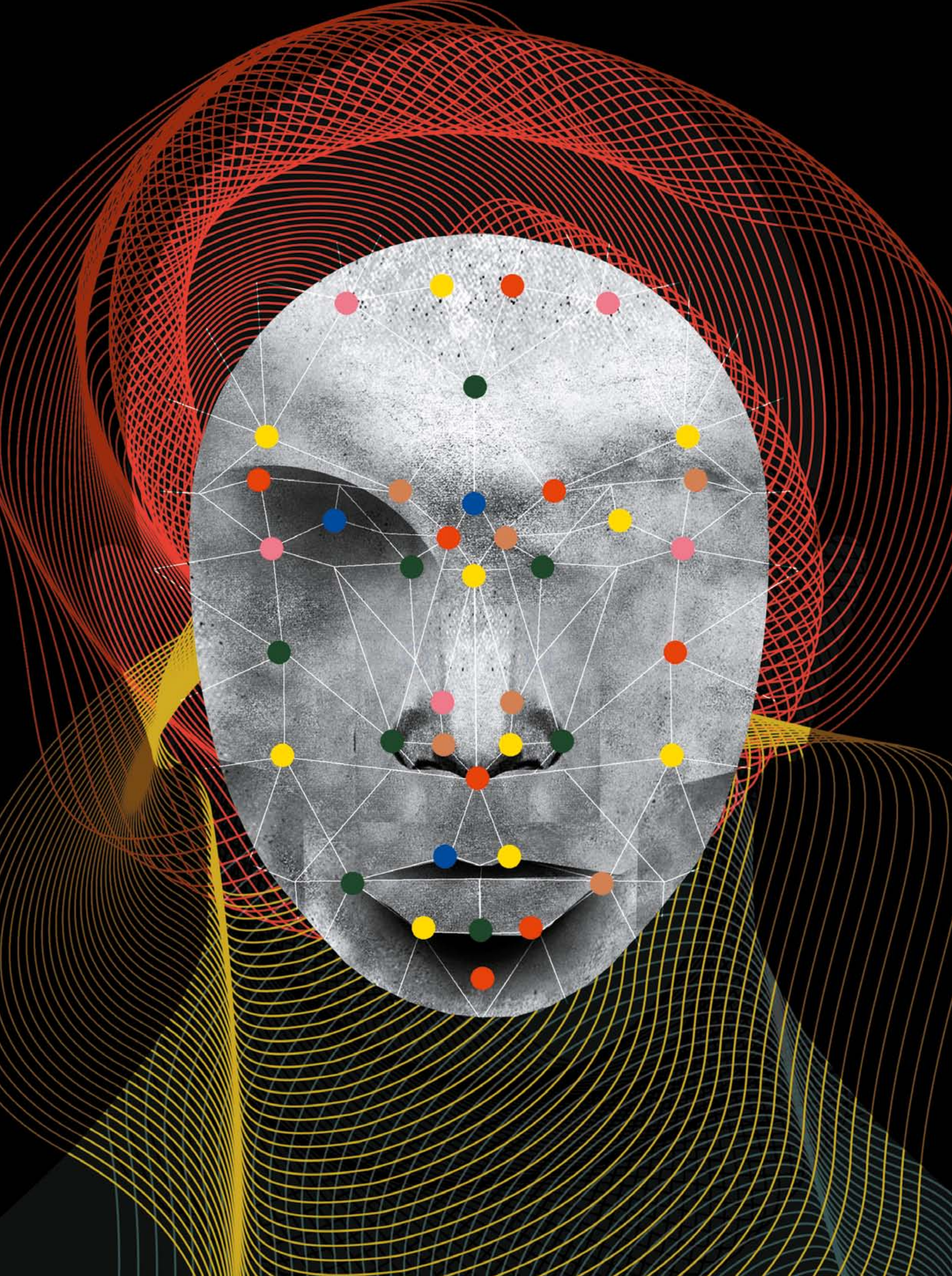
LOS CACTUS exhiben a menudo hermosos patrones geométricos. Este ejemplar presenta una filotaxis espiral de tipo (8,13), al igual que las piñas de las coníferas.

PARA SABER MÁS

Phyllotaxis as a physical self-organized growth process. Stéphane Douady e Yves Couder en *Physical Review Letters*, vol. 68, págs. 2098-2101, marzo de 1992.
The auxin signalling network translates dynamic input into robust patterning at the shoot apex. Teva Vernoux et al. en *Molecular Systems Biology*, vol. 7, art. 508, enero de 2011.
A novel sensor to map auxin response and distribution at high spatio-temporal resolution. Géraldine Brunoud et al. en *Nature*, vol. 482, págs. 103-106, febrero de 2012.
Cytokinin signalling inhibitory fields provide robustness to phyllotaxis. Fabrice Besnard et al. en *Nature*, vol. 505, págs. 417-421, enero de 2014.
Fibonacci or quasi-symmetric phyllotaxis. Part I: Why? Christophe Golé, Jaques Dumais y Stéphane Douady en *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, vol. 85, art. 3533, 2016.
A stochastic multicellular model identifies biological watermarks from disorders in self-organized patterns of phyllotaxis. Yassin Refahi et al. en *eLife*, vol. 5, art. e14093, julio de 2016.
Patterning at the shoot apical meristem and phyllotaxis. Bihai Shi y Teva Vernoux en *Current Topics in Developmental Biology*, vol. 131, págs. 81-107, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Deshojando la margarita. Ian Stewart en *IyC*, marzo de 1995.
Bases moleculares de la floración. Miguel Ángel Blázquez, Manuel Piñeiro y Federico Valverde en *IyC*, mayo de 2011.
Células madre vegetales. Crisanto Gutiérrez en *IyC*, agosto de 2012.
La gramática del crecimiento multicelular. Bartolo Luque en *IyC*, marzo de 2019.



NEUROCIENCIA

VALOR FACIAL



El estudio de las regiones cerebrales responsables del reconocimiento de caras arroja luz sobre los mecanismos neuronales de la visión

Doris Y. Tsao

En un curso introductorio de cálculo que impartía mi instituto, me enseñaron un día la densidad de las curvas. Con una simple pareja de ecuaciones diferenciales que modelizaban las interacciones entre los depredadores y las presas, surgían infinidad de curvas cerradas (imagínese infinitos círculos concéntricos anidados unos dentro de otros). Y no solo eso, la densidad de las curvas variaba según su posición.

Esto último me dejó perpleja, porque si bien me resultaba fácil concebir que una serie finita de curvas se juntaran o separaran, ¿cómo es que una infinidad de ellas era más densa en una parte que en otra? Pronto aprendí que había diversos tipos de infinito con cualidades aparentemente paradójicas, como el hotel inacabable del matemático David Hilbert (cuyas habitaciones están siempre ocupadas, pero siempre hay cabida para nuevos huéspedes) o la bola de Banach-Tarski (que partida en cinco pedazos es posible recomponer en dos bolas del mismo volumen que la original). Dediqué horas de estudio a estas demostraciones matemáticas hasta que lo dejé por su intrascendencia en el mundo tangible, pero la semilla del interés ya había arraigado.

ILUSTRACIÓN DE BRIAN STAUFFER

Más tarde, como estudiante de grado del Instituto de Tecnología de California (Caltech), me sumergí en los experimentos de David H. Hubel y Torsten N. Wiesel y en su descubrimiento decisivo de cómo la corteza visual primaria del cerebro extrae el contorno de las imágenes transmitidas por los ojos [*véase* «Mecanismos cerebrales de la visión», por David H. Hubel y Torsten N. Wiesel; Investigación y Ciencia, noviembre de 1979]. Reparé en que lo que me había desconcertado en el instituto era en realidad el intentar *visualizar* infinitos de distintas densidades. A diferencia de los trucos matemáticos que había estudiado, las neuronas que procesan los bordes descritos por Hubel y Wiesel existen de verdad. Acabé por darme cuenta de que la neurociencia visual es un modo de conocer cómo surge la percepción consciente de una curva a partir de esa actividad neuronal.

No consigo describir la emoción que ese descubrimiento me causó. Opino que en cada etapa de la vida uno tiene un cometido, y el de cualquier universitario es soñar hasta dar con lo que te conquista el corazón y parece ser digno de consagrarle una vida. Hasta diría que la etapa más importante en la ciencia es hallar el problema correcto. Quedé cautivada por el reto de conocer los entresijos de la visión y me embarqué en el estudio del modo en que la actividad eléctrica del cerebro codifica la percepción visual de los objetos, no solo rectas y curvas, sino algunos de tan difícil definición como una cara. La consecución de ese objetivo exigía delimitar con exactitud las regiones del cerebro responsables del reconocimiento facial, así como descifrar el código neuronal subyacente, o sea, cómo logramos reconocer a las personas que nos rodean a través de una secuencia de impulsos eléctricos.

El viaje de descubrimiento comenzó en la Universidad Harvard, donde, ya graduada, estudié la estereopsia, el mecanismo con el cual se construye lo más profundo de la percepción a partir de las diferencias entre las imágenes que se forman en cada ojo. Un día me topé con un artículo de la neurocientífica Nancy Kanwisher, hoy en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), y sus colaboradores en el que daba a conocer el descubrimiento de una región del cerebro que responde con más intensidad a las imágenes de caras que a las de ningún otro objeto cuando a una persona se le practica una resonancia magnética funcional (RMf) en ese órgano. El artículo me pareció singular. Estaba habituada a dividir el cerebro en partes como los ganglios basales o la corteza orbitofrontal, que desempeñaban cierto propósito vago que solo empezábamos a entrever. La idea de una región dedicada específicamente a procesar las caras parecía demasiado fácil de entender y, por ende, inverosímil. Cualquiera podía plantear una conjetura razonable sobre la función de una región así, como que probablemente representase todos los rostros que nos resultan familiares, aparte de particulares sobre su expresión y sexo.

Como estudiante de doctorado, había recurrido a la RMf con monos para identificar las regiones que se activan por la percepción de la tridimensionalidad en las imágenes. Así que decidí mostrar retratos e imágenes de otros objetos a uno. Cuando comparé la activación cerebral motivada por las caras con la desatada por otros objetos, comprobé que la visión del rostro provocaba la activación selectiva de varias regiones del lóbulo temporal (el ubicado bajo la sien), sobre todo pertenecientes a la corteza inferotemporal (IT). Charles Gross, pionero en el campo de la visión de objetos, había descubierto las neuronas selectivas de las caras en la corteza IT del macaco a inicios de los setenta del siglo xx. Según él, estas células estaban esparcidas aleatoriamente por esa corteza. Nuestros resultados de RMf aportaron el primer indicio de que las neuronas faciales podían estar concentradas en regiones.



Doris Y. Tsao es catedrática de biología en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) e investigadora en el Instituto Médico Howard Hughes. También es directora del Centro para Neurociencia de Sistemas de Tianqiao y Chrissy Chen en el Caltech. El pasado octubre recibió una beca de la Fundación MacArthur.

LAS ÁREAS FACIALES

Después de publicar ese trabajo, me invitaron a dar una charla sobre el estudio con RMf para optar a una plaza de docente en el Caltech, que no acabé ganando. Muchos desconfiaban del valor de la RMf, que mide el riego sanguíneo a escala local. Alegaban que el incremento del riego en una región del cerebro cuando alguien está mirando caras dista de revelar qué neuronas de esa región están activas, pues la relación entre el torrente circulatorio y la actividad eléctrica no está clara. Quizá solo era casualidad que esas áreas faciales contuvieran un número ligeramente mayor de neuronas que respondían a las caras, como icebergs agrupados al azar en el mar.

Puesto que las imágenes procedían de experimentos con monos, pude abordar enseguida ese problema insertando un electrodo en cada región facial identificada por la RMf e indagando qué imágenes excitaban más cada una de las neuronas de esa región. Llevé a cabo el experimento junto con Winrich Freiwald, por entonces becario posdoctoral del laboratorio de Margaret Livingstone en Harvard, donde yo era solo una graduada. Le mostramos caras y otros objetos a un mono mientras amplificábamos la actividad eléctrica captada por el electrodo en cada neurona. Para seguir las respuestas en el acto, convertimos la señal eléctrica de la neurona en una señal de audio que pudimos oír a través de un altavoz.

El experimento reveló algo asombroso: casi todas las neuronas de la región identificada por la RMf se dedicaban al procesamiento facial. Recuerdo la emoción de nuestra primera grabación, al escuchar los chasquidos de una neurona tras otra, mientras respondían con fuerza a las caras y muy poco a los demás objetos. Habíamos dado con algo importante: un trozo

EN SÍNTESIS

El conocimiento de la visión sigue siendo uno de los grandes retos de la neurociencia. Un aspecto clave estriba en el modo en que el cerebro reconoce las caras, el emblema social más importante.

Las neuronas de ciertas regiones de la corteza cerebral, denominadas áreas faciales, están especializadas en esta tarea. El descubrimiento de la organización de las áreas faciales permitió deducir los cálculos que ejecuta el cerebro cuando identifica un rostro.

Este código neuronal podría servir como una piedra de Rosetta para conocer la representación de otros objetos, además de las caras.

de la corteza que podía revelar el código cerebral de alto nivel para los objetos visuales. Con respecto a las áreas faciales, Margaret insinuó que habíamos encontrado un huevo de oro.

También recuerdo la estupefacción que me causó aquel primer experimento. Esperaba que la región facial alojara las neuronas que responden selectivamente a determinados individuos, por analogía con las neuronas de la orientación radicadas en la corteza visual primaria, que responden cada una a una orientación específica de los bordes. De hecho, en una serie de estudios que gozaron de gran difusión se había sugerido que cada neurona podía ser sumamente selectiva de la cara de alguien conocido, digamos que una de ellas respondería solo a Jennifer Aniston. En cambio, cada neurona parecía activarse con fuerza ante casi todas las caras.

Durante esos primeros experimentos seguí manipulando con frenesí el Photoshop y descubrí que las neuronas no solo respondían a los rostros de seres humanos y monos, sino a bocetos muy simplificados de un rostro.

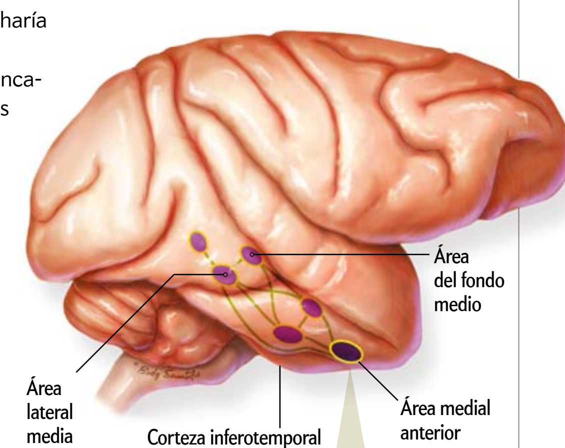
Ante ese fenómeno, decidí crear bocetos con 19 rasgos que parecían pertinentes para definir un rostro reconocible, como la distancia interocular, la proporción entre la altura y la anchura máximas del rostro o la altura de la boca, entre otros. A continuación, alteramos esos valores (por ejemplo, variando la distancia entre los ojos hasta crear una mirada casi ciclópea o una casi batracia). Cada neurona respondió a la mayoría de las caras, pero resultó interesante que no mostraran siempre exactamente la misma tasa de descarga con todas, sino que había una variación sistemática de la respuesta. Cuando representamos esa actividad neuronal en función de los distintos rasgos de los bocetos, hallamos una pauta, consistente en una respuesta mínima a un rasgo extremo (por ejemplo, la distancia interocular más pequeña), una respuesta máxima al extremo opuesto (la mayor separación ocular) y respuestas intermedias a los rasgos con valores intermedios. La respuesta al valor de cada rasgo seguía un trazo inclinado, una pendiente ascendente o descendente.

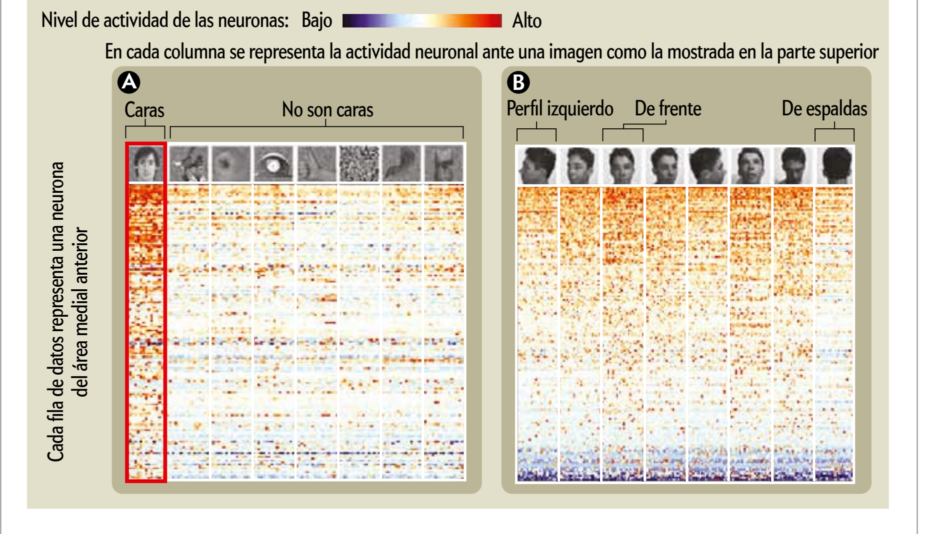
Me invitaron a impartir una nueva charla para otra vacante en el Caltech. Esta vez pude ofrecer más que unas simples imágenes de RMf. Con los recientes resultados de los registros obtenidos de cada neurona, a todo el mundo le quedó claro que las áreas faciales eran reales y que probablemente su cometido en el reconocimiento de caras era importante. Además, el conocer los procesos neuronales subyacentes parecía un buen modo de avanzar en el problema general de cómo representa el cerebro los objetos visuales. Esta vez obtuve la plaza.

ANATOMÍA DEL RECONOCIMIENTO

El mapa de los detectores faciales

Un conjunto de seis nódulos ubicados en la corteza inferotemporal de los dos hemisferios cerebrales están especializados en la identificación de caras. Estas «áreas faciales» parecen funcionar como una cadena de montaje: en las áreas lateral media y del fondo medio, una neurona se activaría cuando la cara mira de frente; a su vez, otra lo haría cuando mira a la derecha. Al final de la cadena, en el área medial anterior, se encajarían las diferentes vistas. Las neuronas de este área se activan en respuesta a la cara de un individuo concreto, sin importarles si mira de frente o para un lado. Se generan respuestas desde el área facial de un mono cuando este visualiza caras, pero no otros objetos (*áreas en rojo en* Ⓐ), y del mismo individuo, como el hombre del cabello oscuro, desde ángulos diferentes (*áreas en rojo en* Ⓑ).





DE «FUNCTIONAL COMPARTMENTALIZATION AND VIEWPOINT GENERALIZATION WITHIN THE MACAQUE FACE-PROCESSING SYSTEM», POR WINRICH A. FREIWALD Y DORIS Y. TSAO, EN *SCIENCE*, VOL. 330, 5 DE NOVIEMBRE DE 2010 (*cuadrícula de datos y fotografías insertas*); BODY SCIENTIFIC (*encéfalo*)

EN EL CONTRASTE ESTÁ LA CLAVE

En el Caltech, mis colegas y yo seguimos ahondando en los mecanismos neuronales del reconocimiento facial. Nos inspiró un artículo de Pawan Sinha, neurocientífico computacional y de la visión del MIT, donde planteaba que un rostro sería discernible en virtud de ciertas relaciones de contraste entre las diversas regiones faciales, por ejemplo, si la zona de la frente brilla más que la zona de la boca. Sinha propuso un modo ingenioso de averiguar qué relaciones de contraste servirían para reconocer un rostro: debían ser las invariables a los cambios de iluminación. Por ejemplo, «el ojo izquierdo más oscuro que la nariz» es un rasgo útil, pues no importa de dónde provenga la luz en la foto, de arriba o de abajo, de la izquierda o de la derecha, el ojo izquierdo siempre será más oscuro que la nariz —compruébelo usted mismo.

En teoría, tal idea brinda un mecanismo computacional sencillo y elegante para el reconocimiento facial, por lo que nos preguntamos si las neuronas faciales podrían servirse de él. Cuando medimos su respuesta a las caras con variaciones del brillo en diversas partes, hallamos a menudo en ellas una preferencia notoria por cierto rasgo contrastado de la imagen.

Para nuestro asombro, casi todas las neuronas compartían las mismas preferencias de contraste y tan solo una prefería la polaridad opuesta. Además, los rasgos preferidos eran precisamente los que Sinha señaló como invariables a los cambios de iluminación. Así pues, el experimento confirmó que las neuronas faciales utilizan las relaciones de contraste para detectar las caras.

A grandes rasgos, el resultado confirmó que se trataba realmente de neuronas faciales. En las charlas, los escépticos preguntarían cómo lo sé, porque piensan que no puedo analizar cada posible estímulo. También dirían que no se puede estar seguro de que sea una neurona facial y no una neurona de granada o de cortacésped, por ejemplo. Este resultado no dejaba lugar a dudas: resultaba asombroso que la predicción computacional de Sinha y la manera en que las neuronas reaccionaban a los cambios en partes del rostro concordaran tanto.

Nuestros primeros experimentos habían revelado que dos áreas corticales cercanas se activaban ante la visión de una cara. Pero otro estudio de RMf (con un medio de contraste que incrementaba varias veces la robustez de la señal) dejó patente que, en realidad, el lóbulo temporal de cada hemisferio albergaba seis áreas faciales, con lo que sumábamos una docena de huevos de oro. Además, no estaban dispersas al azar por la corteza IT, sino ubicadas en puntos similares de ambos hemisferios. Y no solo eso, gracias a la labor de nuestro equipo y de otros grupos se ha comprobado que tales áreas de la corteza IT siguen una distribución parecida en el ser humano y en otros primates como el tití.

De ese patrón estereotipado se deducía que las áreas podrían constituir una especie de cadena de montaje para el procesamiento facial. De ser así, cabría esperar que las seis estuvieran conectadas y que cada una desempeñara una función.

Para explorar esas hipotéticas conexiones neuronales, sometimos varias áreas a microdescargas eléctricas (microestimulación) mientras el mono permanecía en el imán de RM. Pretendíamos averiguar qué otras partes del cerebro entraban en liza cuando se estimulaba un área facial concreta: siempre que estimulábamos una, se activaban las demás, pero no la corteza circundante. Sin duda, esto era un indicio de su estrecha interconexión. También comprobamos que cada una desempeñaba una función. Mostramos a los monos retratos de 25 personas, cada uno con ocho orientaciones distintas de la cabeza y grabamos la respuesta de las neuronas ubicadas en tres regiones: las áreas lateral media y del fondo medio (LM/FM), el área lateral anterior (LA) y el área medial anterior (MA).

Hallamos diferencias llamativas entre las tres. En las LM/FM, las neuronas respondieron selectivamente a orientaciones específicas. Por ejemplo, una célula parecía preferir los rostros que miraban de frente, mientras otra parecía optar por los orientados hacia la izquierda. En la LA, no eran tan específicas de la orientación facial: un tipo de neurona respondía a los rostros que miraban arriba, abajo y de frente; otro a los girados a la izquierda o a la derecha. En la MA, respondían a individuos concretos, ya fuese su orientación frontal o de perfil. Así pues, en los límites de la red, en la MA, las distintas vistas ya habían quedado bien tramadas entre sí y la orientación dejaba de ser determinante.

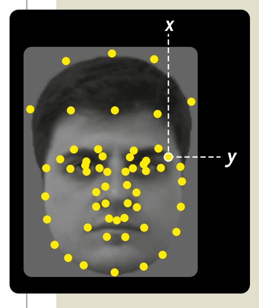
Al parecer, las áreas faciales actúan como una cadena de montaje

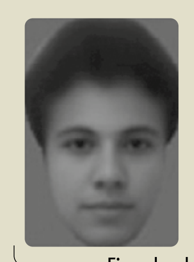
TRAS LA PISTA

Forma + Aspecto = Cara

El descubrimiento de las áreas faciales fue solo el primer paso. A continuación, hubo que explorar qué ocurría en las neuronas de cada área, lo que desató la búsqueda del sistema de codificación que el cerebro aplica a los rostros. Para obtener mediciones cuantitativas de estos, el laboratorio de Tsao incorporó 25 rasgos de la forma y 25 del aspecto que podían usar cada una de las neuronas de un área facial (una suerte de espacio facial quincuadimensional). Los rasgos morfológicos vendrían definidos por el esqueleto (la anchura del cráneo o la distancia interocular), mientras que los rasgos del aspecto definirían la textura de la superficie (complexión, color de ojos o del cabello, etcétera).

Forma: descrita por la posición (*coordenadas x, y*) de los rasgos distintivos (*puntos amarillos*)







Ejemplos de variabilidad



Promedio

Aspecto: variaciones de la luminosidad de la imagen después de alinearla primero para hacerla coincidir con una forma facial promedio









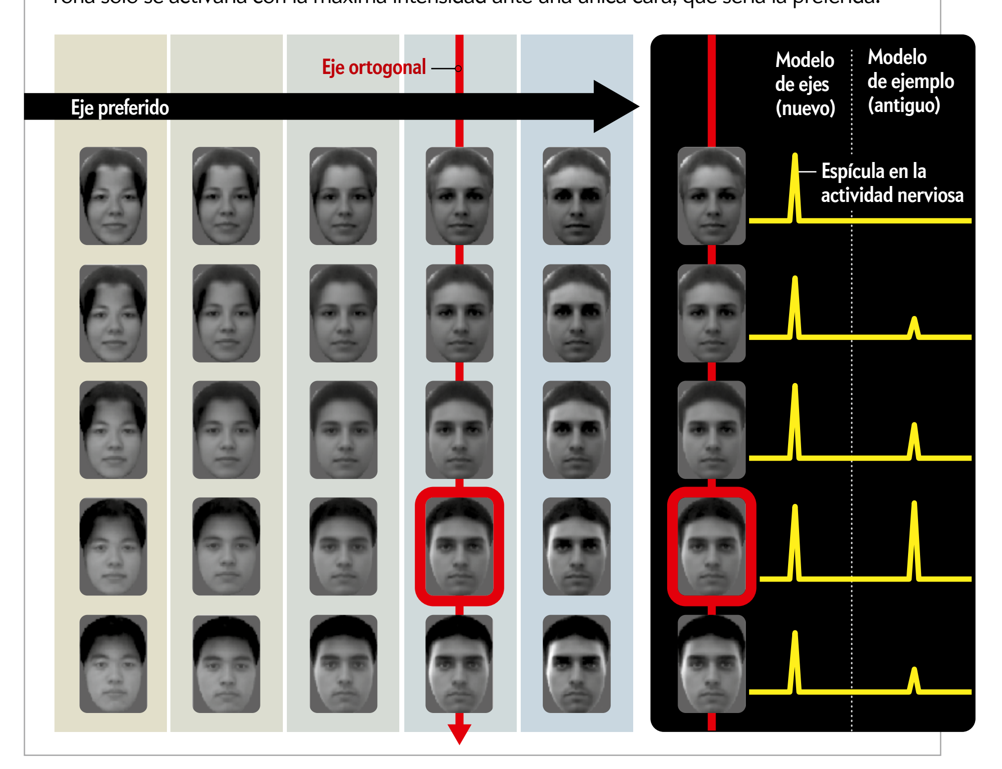
Ejemplos de variabilidad

DE «THE CODE FOR FACIAL IDENTITY IN THE PRIMATE BRAIN», POR LE CHANG Y DORIS Y. TSAO, EN *CELL*, VOLUMEN 169, N.º 6, 1 DE JUNIO DE 2017 (*imágenes faciales*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

LA NUEVA HIPÓTESIS

El código facial, por fin

Al ser 50 coordenadas las que describen la forma y el aspecto es posible describir la activación neuronal en respuesta a una cara concreta como un código visualizable en una escala geométrica. En este código, cada neurona facial recibe la información de un rostro en forma de 50 coordenadas o dimensiones. A continuación, la neurona se activa con una intensidad concreta ante una cara determinada (enmarcada en rojo), a lo largo de lo que se denomina el eje preferido. La intensidad se va incrementando a un ritmo constante (monotónicamente) por el eje preferido. Además, la respuesta es la misma para cada cara situada en un eje ortogonal al eje preferido, aunque esas faces parezcan muy distintas. Este modelo axial de la codificación facial difiere del modelo anterior mostrado como ejemplo, en el cual cada neurona solo se activaría con la máxima intensidad ante una única cara, que sería la preferida.



para resolver una de las grandes dificultades que entraña la visión: el reconocer las cosas que nos rodean a pesar de su aspecto cambiante. Un automóvil adopta múltiples formas y colores, puede aparecer en cualquier ángulo de visión y distancia, o quedar parcialmente oculto por objetos interpuestos, como árboles u otros automóviles. El reconocimiento de un objeto a pesar de esas variaciones visuales se denomina el problema de la invarianza, y quedó claro que una de las principales funciones de la red de áreas faciales consiste en superar esa dificultad.

Dada la gran sensibilidad de las neuronas de esas áreas a los cambios de la identidad facial, cabía esperar que la alteración de sus respuestas neuronales modificase la percepción de la identidad facial en los animales. Josef Parvizi y Kalanit Grill-Spector, neurocientíficos de la Universidad Stanford, habían electroestimulado una región de las áreas faciales en personas a las que les habían implantado electrodos en el cerebro para descubrir el origen de sus crisis epilépticas. Así descubrieron que la estimulación distorsionaba su percepción de las caras.

Nos preguntamos si hallaríamos el mismo efecto en los monos cuando estimuláramos sus áreas faciales. ¿Alteraríamos solo la percepción de las caras o también la de otros objetos? La frontera entre un rostro y un objeto que no lo es resulta difusa, porque, con la suficiente motivación, hay quien verá uno en una nube o en una toma eléctrica. Queríamos utilizar la microestimulación eléctrica como herramienta para delinear con precisión qué constituye una cara para un área facial. Entrenamos a los monos para que, cuando les presentáramos dos caras seguidas, nos indicaran si eran la misma o no. En concordancia con los resultados previos en humanos, comprobamos que la microestimulación de las áreas faciales distorsionaba enormemente la percepción, de modo que el animal siempre acababa señalando como distintas dos caras idénticas.

Curiosamente, la microestimulación no tuvo efecto alguno sobre la percepción de muchos objetos que no eran rostros, pero alteraba notablemente la respuesta a unos cuantos objetos cuya forma coincide más o menos con la de un rostro, como una manzana. ¿Por qué esa estimulación influía en la percepción de esa fruta?

Una posibilidad es que las áreas faciales sirvan para representar no solo las caras, sino también otros objetos redondos, como una manzana. Otra hipótesis es que no se suelan emplear para la representación de esos objetos, pero que la estimulación haga que una manzana semeje una cara. Seguimos sin saber si estas áreas reconocen otros objetos que no sean caras.

DESCIFRAMOS EL CÓDIGO

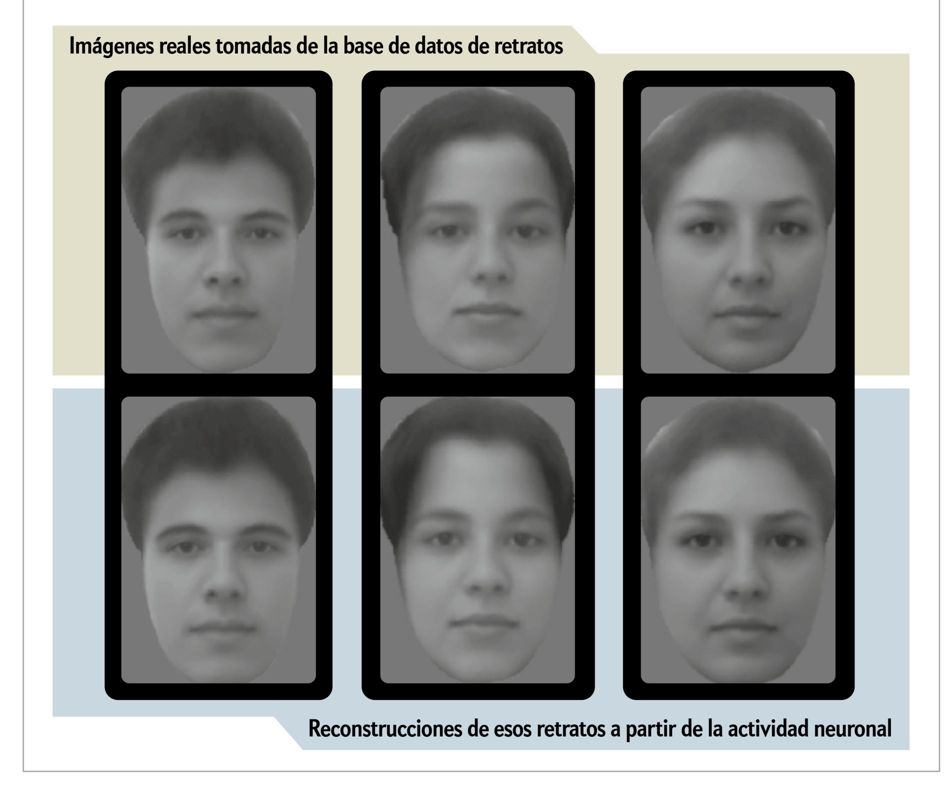
Descubrir la organización del sistema de las áreas faciales y las propiedades de las neuronas que acoge fue todo un logro. Pero mi sueño cuando comenzamos a grabar las señales de las áreas no acababa ahí. Intuía que esas células nos permitirían descifrar el código neuronal que rige la identificación facial: conocer con tan sumo detalle el procesamiento que cada neurona hace de las caras que fuera posible predecir la respuesta de una de ellas a cualquier rostro o saber la identidad del rostro a partir de la actividad neuronal en exclusiva.

La mayor dificultad radicaba en averiguar el modo de describir las caras de forma cuantitativa y con gran precisión. Le Chang, por entonces un posdoctorado de mi laboratorio, tuvo la genialidad de adoptar una técnica del campo de la visión computacional, el modelo de apariencia activa. Con ella, cada rostro tiene dos conjuntos de descriptores, uno para la forma y otro para el aspecto. Había que pensar que los rasgos morfológicos vienen definidos por el esqueleto (la anchura del cráneo o la distancia interocular), mientras que los propios del aspecto definen la textura de la superficie (complexión, color de los ojos o del cabello, etc.).

DEMOSTRACIÓN A LA INVERSA

Imágenes que valen 205 neuronas

Es posible predecir cómo responderá una neurona ante una cara en particular si tomamos la suma ponderada de las 50 coordenadas faciales. Para predecir qué rostro ha visto un mono a partir de su actividad neuronal, basta con invertir todo el proceso: si se conoce la respuesta de 205 neuronas faciales, se pueden predecir las 50 coordenadas que definen los rasgos faciales exactos, y con ello reconstruir con suma precisión ese rostro.



DORIS Y. TSAO (*imágenes faciales*)

Con el fin de generar esos descriptores de la forma y del aspecto, pusimos en marcha una gran base de datos de retratos. A cada uno le adjudicamos un conjunto de marcadores sobre rasgos clave. La localización espacial de esos marcadores describía la forma del rostro. A partir de esas diferentes formas, calculamos un rostro promedio. Transformamos entonces cada retrato de la base de datos para que los rasgos clave concordaran con exactitud con los del rostro promedio. Las imágenes resultantes constituyeron el aspecto de las caras con independencia de la forma.

A continuación, llevamos a cabo un análisis de los componentes principales con independencia de los descriptores de la forma y del aspecto con todo el conjunto de rostros. Se trata de una técnica matemática que encuentra las dimensiones que más varían en un conjunto complejo de datos.

Tomamos los primeros 25 componentes principales de la forma y los primeros 25 del aspecto y creamos un espacio facial quincuadimensional (50D). Este es similar al espacio tridimensional al que estamos acostumbrados, pero cada punto representa una cara en vez de una posición espacial y consta de muchas más dimensiones. En las tres dimensiones es posible describir cualquier punto con tres coordenadas (x, y, z), en tanto que en el espacio facial se describe con 50.

En nuestro experimento, dibujamos 2000 caras al azar y se las mostramos a un mono mientras grabábamos las señales emitidas por neuronas ubicadas en dos parches faciales. Casi todas las células mostraban respuestas graduales, como una pendiente ascendente o descendente, para el subconjunto de 50 rasgos. Esto encajaba con los primeros experimentos con los bocetos de caras, pero ahora teníamos una nueva idea sobre su importancia: si una neurona facial se ajusta gradualmente a los distintos rasgos, su respuesta se puede aproximar en líneas generales mediante una simple suma ponderada de los rasgos faciales, en donde los pesos están determinados por la pendiente del ajuste gradual. En otras palabras:

respuesta de las neuronas faciales = matriz de pesos × 50 rasgos faciales

Si despejamos la ecuación de forma que nos permita predecir la cara que se muestra a partir de la respuesta de las neuronas faciales:

50 rasgos faciales = (matriz de pesos)$^{-1}$ × respuesta de las neuronas faciales

Al principio, esta ecuación nos pareció increíblemente sencilla. Para ponerla a prueba, usamos la respuesta a las 2000 caras, menos una, para entrenar la matriz de ponderación y luego intentamos predecir los 50 rasgos faciales de la cara excluida. Y maravilla: la predicción apenas se podía distinguir del rostro real.

UNA APUESTA GANADORA

En un congreso celebrado en Ascona, Suiza, presenté nuestros hallazgos sobre la reconstrucción de rostros a partir de la actividad neuronal. Después de mi charla, Rodrigo Quian Quiroga, el descubridor de la famosa neurona de Jennifer Aniston en el lóbulo temporal medial humano en 2005, en la actualidad adscrito a la Universidad de Leicester, me preguntó qué relación podrían tener mis células con su idea de que cada neurona reacciona a la cara de una persona concreta. La neurona de J. Aniston, también conocida como la neurona de la abuela, es un tipo hipotético que se activa ante la cara de un conocido, bien sea una celebridad o un pariente cercano.

Le dije a Rodrigo que pensaba que nuestras neuronas podían ser los cimientos de las suyas, sin pararme a pensar en profundidad cómo funcionaría. Aquella noche, que pasé en vela por culpa del desfase horario, reparé en la principal diferencia entre nuestras neuronas faciales y las suyas. En mi charla describí que las nuestras calculaban su respuesta como sumas ponderadas de los diversos rasgos faciales. En mitad de la noche, me di cuenta de que ese cálculo es el mismo que la operación matemática denominada producto escalar, cuya representación geométrica

es la proyección de un vector sobre un eje (igual que el sol proyecta la sombra de un mástil en el suelo).

Me acordé del álgebra lineal de la universidad y caí en la cuenta de que esto implicaba que debemos ser capaces de construir un gran «espacio nulo» de caras para cada neurona, esto es, una serie de caras de identidad variable situadas sobre un eje perpendicular al eje de proyección. Además, todas esos rostros harían que la neurona se activase exactamente de la misma manera.

Esto, a su vez, indicaría que las neuronas de las áreas faciales son fundamentalmente distintas de las neuronas de la abuela. Echaría por tierra la vaga intuición que todo el mundo compartía sobre las neuronas faciales, esto es, que se tenían que ajustar a caras concretas.

A la mañana siguiente, fui la primera en llegar al vestíbulo del congreso para el desayuno, a las 5 de la mañana, donde esperaba encontrarme con Rodrigo para contarle mi ilógica predicción. Lo más asombroso fue que, cuando apareció, me dijera que había tenido exactamente la misma idea. Así que hicimos una apuesta en unos términos que Rodrigo procuró que fueran ventajosos para mí. Si resultaba que cada neurona realmente daba la misma respuesta a distintos rostros, yo le enviaría una botella de buen vino. Si, en cambio, la predicción no prosperaba, sería yo quien recibiera una botella de consolación.

En busca de una respuesta ya de vuelta en nuestro laboratorio de Caltech, Le Chang cartografió primero el eje preferido para una neurona dada en función de la respuesta a las 2000 caras. Luego, mientras seguía grabando la misma neurona, generó un abanico de caras que podían colocarse en un eje perpendicular al eje preferido de esa célula. Resultó extraordinario que todos esos rostros desencadenaran exactamente la misma respuesta en la neurona. A la semana siguiente, Rodrigo recibió una exquisita botella de Cabernet.

El hallazgo demostró que las neuronas faciales no codifican la identidad de cada individuo en la corteza IT, sino que realizan una proyección sobre un eje, un cálculo mucho más abstracto.

Los colores se prestan a una analogía oportuna. Se les puede designar con un nombre específico, como rosa pervinca, amarillo celidonia o azul celeste, pero otra opción consiste en codificarlos con combinaciones de tres dígitos que representen la cantidad de rojo, verde y azul que conforman cada uno. En este último esquema, una neurona de color que realice una proyección sobre el eje rojo generaría impulsos eléctricos, o picos, proporcionales a la cantidad de rojo presente en cualquier color. Tal neurona se activaría con la misma intensidad ante un tono marrón o amarillo que contuviera la misma cantidad de rojo mezclado con los otros colores. Las neuronas faciales emplean el mismo esquema, pero en vez de solo tres ejes, son 50. Y en lugar de la cantidad de rojo, verde o azul, cada eje codifica el grado en que la forma o el aspecto de cada cara particular se desvía del de una cara promedio.

Parecería entonces que las neuronas de Jennifer Aniston no existen, al menos no en la corteza IT. Pero cada una de las que responden selectivamente a un familiar o conocido pueden seguir operando en una parte del cerebro que procese la salida de las neuronas faciales. Las regiones donde reside la memoria (el hipocampo y las áreas circundantes) podrían contener las neuronas que ayudan a reconocer a alguien que hemos visto antes, afines a las famosas neuronas de la abuela.

Por tanto, el reconocimiento facial en la corteza IT descansa en un conjunto de unos 50 números que representan la medición de una cara a lo largo de un conjunto de ejes. El descubrimiento de tan simple código de identificación facial tiene implicaciones importantes para nuestro conocimiento de la representación de los objetos visuales. Es posible que toda la corteza IT se organice con los mismos principios que gobiernan el sistema de las áreas faciales, con agrupaciones de neuronas que codifiquen distintos conjuntos de ejes para representar un objeto. En la actualidad, estamos llevando a cabo experimentos para contrastar esta idea.

LA PIEDRA ROSETTA NEURONAL

Si usted visita el Museo Británico, podrá contemplar una pieza excepcional, la piedra de Rosetta. En ella aparece grabado un decreto del faraón Ptolomeo V en tres lenguas: jeroglíficos egipcios, demótico y griego antiguo. Como los filólogos conocían el griego antiguo, gracias a ella se pudo descifrar las otras lenguas. De igual forma, las caras, las áreas faciales y la corteza IT constituyen una piedra de Rosetta neuronal, que todavía se está descifrando. Al mostrar imágenes de caras a los monos, descubrimos las áreas faciales y supimos cómo las neuronas de su interior detectan y reconocen un rostro. A su vez, el conocimiento de los principios de la codificación en la red de áreas faciales podría desvelarnos la organización de toda la corteza IT, lo que revelaría la codificación de la identidad de los objetos de manera más general. Quizás esta corteza acoja otras redes especializadas en el procesamiento de otros tipos de objetos (una ajetreada fábrica con numerosas cadenas de montaje).

También espero que el código de la identidad facial nos ayude a cumplir el sueño de mi colega: descubrir cómo imaginamos las curvas. Ahora que conocemos las áreas faciales, podremos enseñar a los animales a que imaginen caras y explorar cómo consigue la imaginación, una acción puramente interior, dar forma a la actividad neuronal. Surgen así muchas otras incógnitas: ¿reactiva la imaginación el código de la cara imaginada en las áreas faciales? ¿Reaviva representaciones incluso más antiguas de los contornos y tonos que aportan la información que el sistema de las áreas faciales analiza? Ahora tenemos las herramientas para responder a ellas y conocer mejor la manera en que el cerebro ve los objetos, tanto los imaginarios como los reales.

Todos los comportamientos esenciales del cerebro (consciencia, memoria visual, toma de decisiones y lenguaje) precisan de la interacción con objetos, por lo que conocer en profundidad cómo se perciben estos nos ayudará a comprender mejor el órgano en su conjunto, no solo la corteza visual. Tan solo empezamos a resolver el enigma de la cara.

PARA SABER MÁS

The code for facial identity in the primate brain. Le Chang y Doris Y. Tsao en *Cell*, vol. 169, n.º 6, págs. 1013-1028; 1 de junio de 2017.
How do we recognize a face? Rodrigo Quian Quiroga en *Cell*, vol. 169, n.º 6, págs. 975-977; 1 de junio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Por la cara. Susana Martínez-Conde y Stephen L. Macknick en *MyC* n.º 56, 2012.
Reconocimiento facial en insectos. Elizabeth A. Tibbetts y Adrian G. Dyer en *IyC*, mayo de 2014.
Un retratista en el cerebro. Sabrina Schröder en *MyC* n.º 86, 2017.
Expertos en caras. Meike Ramon y Anna Bobak en *MyC* n.º 89, 2018.

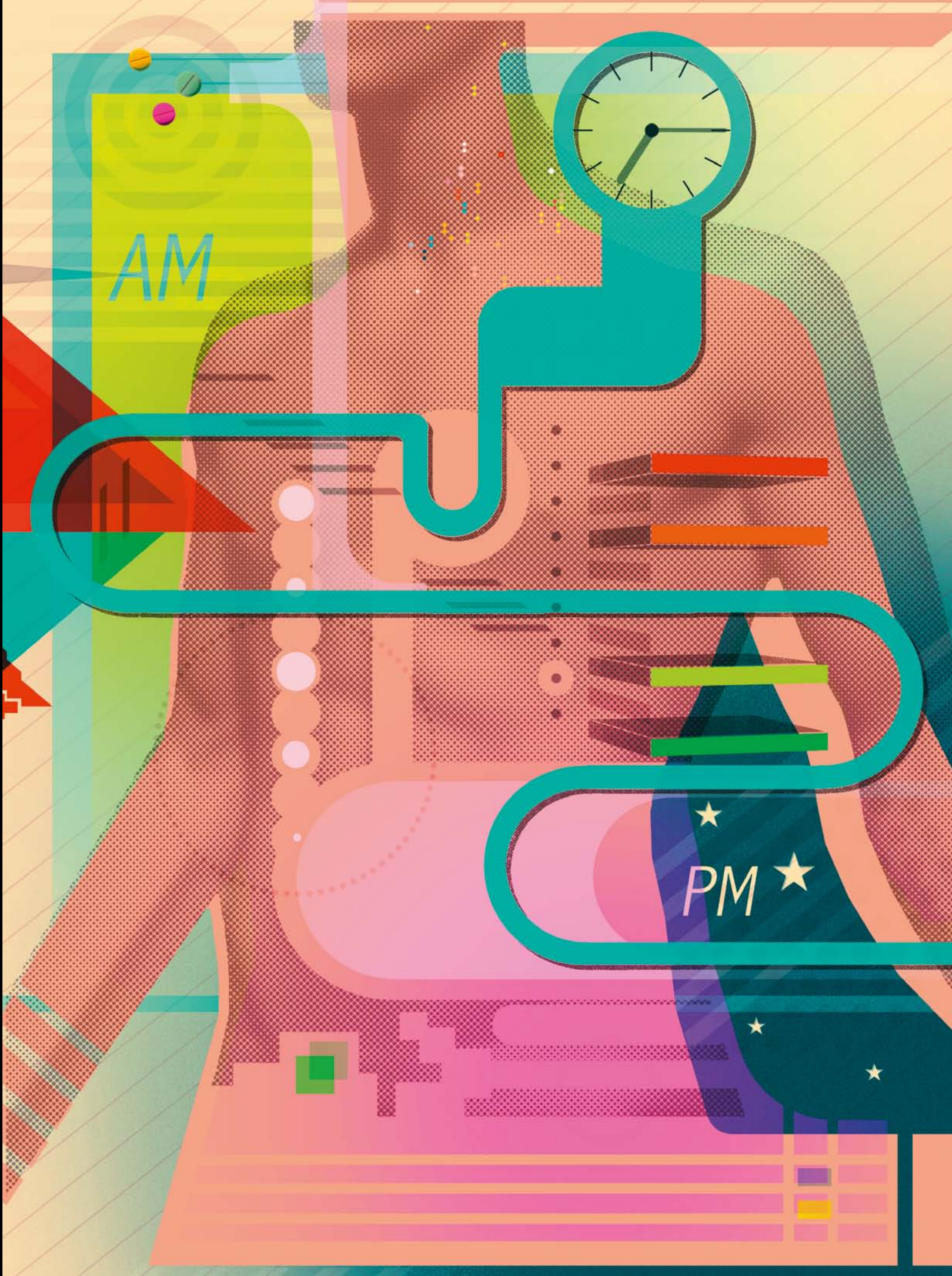
CRONOBIOLOGÍA

La expresión de los genes sigue un ciclo diario. Este conocimiento puede aprovecharse para determinar el mejor momento del día para administrar un fármaco

EL RELOJ INTRA-CELULAR

Veronique Greenwood

Ilustración de Mark Allen Miller


AM
PM

Veronique Greenwood, licenciada en biología por la Universidad Yale, es periodista científica. Su trabajo ha aparecido en *New York Times, Atlantic* y *National Geographic*, entre otras publicaciones.



En la madrugada de una noche medieval, un monje comienza a respirar con dificultad y a gritar atemorizado. Sus hermanos llaman al curandero, que trata de consolarlo como puede porque sabe que el asma es una fiera nocturna. Pero en este escenario hipotético, que podría haber tenido lugar en miles de oscuros cuartos y dormitorios a través de los años, lo único que se podía hacer era esperar a que los síntomas remitieran.

Gracias a los antiguos tratados de medicina, ahora sabemos que los médicos conocían desde hace mucho que determinados trastornos presentan variaciones diarias. En el siglo v, el médico romano Caelius Aurelianus describió que los ataques de asma eran más frecuentes por la noche. En 1568, el médico alemán Christopher Wirsung llegó a acotar que se producían entre las dos de la madrugada y el amanecer. También se advirtió que la tensión arterial, la frecuencia cardíaca, y el comienzo del dolor torácico y los infartos de miocardio seguían un cierto ritmo.

Por supuesto, tenemos constancia de esas astutas observaciones junto con otras sugerencias que quedaron relegadas a la medicina tradicional. Las instrucciones de Aurelianus, por ejemplo, para los que tuvieran otitis eran que se cubrieran la zona con una pasta hecha de azafrán, vinagre, mirra, membrillo y otras sustancias que podrían o no servir de algo. Wirsung defendía con firmeza que lo hediondo era malo para el corazón.

Hasta unos siglos más tarde, los científicos no comenzaron a barajar la posibilidad de que podríamos aprovechar los ritmos del cuerpo para obtener beneficios terapéuticos. El biólogo Franz Halberg fue pionero en el estudio de lo que él llamaba cronobiología: la fluctuación regular de los parámetros biológicos a lo largo del tiempo en cada persona e incluso en cada célula. Pero Halberg y otros cronobiólogos tuvieron primero que convencer a sus colegas y a la población de que la cronobiología era una ciencia seria. Cuando lo entrevistaron para la revista *People* en 1978, hacía furor un sistema denominado biorritmos, que utilizaba la fecha de nacimiento para generar un trío de líneas que subían y bajaban con regularidad y que pretendían representar los estados intelectual, físico y emocional. Los Dallas Cowboys, un equipo de fútbol americano, utilizaron los biorritmos para planificar las estrategias de juego. Los biorritmos habrían podido predecir el mortal infarto de corazón de Clark Gable. Durante algún tiempo, hubo quienes los usaban incluso para programar las relaciones sexuales, con la esperanza de influir en el sexo de los hijos.

Halberg, fallecido en 2013, recalcaba que lo que él estudiaba no tenía nada que ver con los biorritmos, a los que calificaba de «tonterías». Al periodista de *People* le dijo: «Hallamos ciclos en cada sistema del cuerpo. Se pueden descubrir, medir y finalmente explotar muchos más. Desde el horario de las comidas hasta el momento de administrar un fármaco contra el cáncer, siempre que trabajemos con los ritmos del cuerpo, y no contra ellos, podremos inclinar la balanza entre salud y enfermedad, e incluso entre supervivencia y muerte».

Al principio, la idea se topó con un considerable escepticismo por su aspecto presuntuoso: ¿cómo podía reducirse el tratamiento del cáncer a una mera pauta horaria? En el artículo de *People* se insinuaba que algunos de los colegas de Halberg tildaban sus ideas de «paranoia». Para la mayoría de los biólogos, no tenía sentido que importase la hora del día, pues se obtenían resultados muy válidos en diferentes experimentos al hacerlos simplemente cuando les parecía más cómodo. En el caso de que, de forma misteriosa, algunos ensayos no dieran los mismos resultados, se podía explicar de muchas maneras.

Sin embargo, hoy los investigadores saben que la hora es un factor real para que un experimento o un tratamiento tenga éxito o fracase. Ya se están esbozando los mecanismos mediante los que la hora del día deja su huella en el organismo, un esfuerzo

EN SÍNTESIS

Se estima que el 82 por ciento de los genes de los mamíferos se expresa con un patrón cíclico de subidas y bajadas, lo que significa que la biología tiene una faceta horaria.

El abanico de implicaciones para la medicina es muy amplio. Entre los 100 fármacos más corrientes, 56 actúan sobre proteínas que se expresan rítmicamente. Por lo tanto, es importante la hora a la que se administran.

En el campo emergente de la cronomedicina se están investigando diversos tratamientos horarios de enfermedades como el cáncer y la artritis reumatoide para elevar al máximo su seguridad y eficacia.

El estudio personalizado de los ritmos circadianos podría demostrar que el momento óptimo del tratamiento es diferente para cada persona. La cronomedicina todavía no ha llegado a la práctica clínica.

que quizás ayude a los médicos a tratar con más eficacia y seguridad una serie de enfermedades.

PERFILES CÍCLICOS DE LA EXPRESIÓN GÉNICA

Ueli Schibler todavía recuerda el día de 1990 en el que un estudiante entró en su despacho y le dijo: «Debe retirar este artículo: todo es mentira». En ese momento, Schibler, a la sazón catedrático en la Universidad de Ginebra, estaba estudiando los factores de transcripción. El ADN que almacena todas las instrucciones necesarias para la vida suele estar bien empaquetado en el núcleo de cada célula. Cuando se necesita un conjunto concreto de instrucciones, es decir, un gen, entonces las proteínas del núcleo desenrollan el segmento pertinente y lo transcriben. El transcrito se dirige a las regiones más externas de la célula para ser leído y utilizado en la construcción de una proteína. Este proceso se denomina expresión génica, y en ella resultan esenciales los factores de transcripción.

Los factores de transcripción tienen formas muy diferentes, pero su característica común es que, mediante su unión al ADN, pueden controlar cómo y cuándo se transcribirá un gen. A su vez, son proteínas fabricadas con las instrucciones codificadas por los genes, lo que confiere una imagen circular a todo el proceso. Un investigador posdoctoral del laboratorio de Schibler había estado trabajado en el aislamiento de un factor de transcripción del hígado. Todo parecía ir rodado: encontró el transcrito de la proteína DBP en las ratas, resolvió la secuencia de la proteína e identificó el gen que la fabricaba. Por entonces, se estaba empezando a conocer cómo los factores de transcripción moldeaban cada tejido, y la caracterización de este poderoso modulador constituía un avance emocionante. Los investigadores publicaron un artículo en la prestigiosa revista *Cell*. Schibler estaba contento y sabía que su posdoc también.

Este último se fue cuando consiguió una plaza de profesor ayudante, por lo que un estudiante retomó el proyecto. Tres meses después, el estudiante dejó caer la bomba: había repetido el experimento muchas veces y el factor de transcripción no aparecía.

Schibler no se acababa de creer que su posdoc hubiera cometido un fraude, aunque no veía ninguna otra opción. Inmediatamente se puso a realizar él mismo el experimento. Esta vez, para su desconcierto, la DBP apareció. Los investigadores analizaron cada variable y acabaron por darse cuenta de una extraña diferencia. El posdoc había llevado a cabo los experimentos con el hígado de las ratas al comienzo de la tarde, al igual que Schibler. Pero el estudiante era hijo de un granjero que llegaba sobre las 7:00 y realizaba el trabajo por la mañana.

Resultaba que, cuando el estudiante buscaba el factor de transcripción, simplemente no estaba presente en una cantidad detectable. Por entonces, se suponía que los genes fabricaban sus productos proteicos más o menos constantemente a cualquier hora del día. Pero el gen responsable de la DBP seguía un ciclo de 24 horas que se repetía cada día: la proteína apenas se sintetizaba por la mañana, pero por la tarde se incrementaba la cantidad unas 300 veces. Schibler y sus colaboradores describieron esta sorprendente pauta en un segundo artículo publicado en *Cell* ese mismo año.

En las décadas posteriores, científicos de todo el mundo han hallado que los genes cuyos perfiles de expresión tienen subidas y bajadas diarias no constituyen aberraciones. A finales de los noventa del siglo XX, investigadores de las cianobacterias, que son fotosintéticas, hallaron que más del 80 por ciento de los genes de estos microorganismos sintetizan las proteínas siguiendo un ritmo circadiano, o diario. Este descubrimiento parecía lógico por su estrecha vinculación con el sol, pero pronto quedó claro que también oscilaban muchos genes de moscas y ratones. En un artículo publicado en 2014, John Hogenesch, hoy en el Centro Médico del Hospital Infantil de Cincinnati, y sus colaboradores analizaron el fenómeno más en profundidad al rastrear la expresión de casi 20.000 genes en 12 tejidos de ratón. Anotaron el nivel de expresión génica cada dos horas y se dieron cuenta de que había horas punta en las que se activaba una gran cantidad de genes: justo antes del amanecer y del anochecer. Además, al fijarse en el número de genes que tenían un comportamiento cíclico, la proporción alcanzó un sorprendente 43 por ciento del genoma.

> Imaginemos el cuerpo como una máquina muy complicada, con miles de dispositivos cuyos engranajes, cestos y muelles deben quedar alineados. Resulta que no hay momento en el que estén presentes todos ellos a la vez

Este estudio se ha citado desde entonces más de 450 veces, según el Google Académico, ya que el goteo de artículos sobre expresión génica circadiana se ha convertido en una riada. En los mamíferos, la estimación de los genes que se rigen por el reloj asciende al 82 por ciento, según el trabajo con primates no humanos publicado en febrero de 2018 en *Science* por Satchidananda Panda, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, en California, y sus colaboradores. Panda atribuye en parte esta diferencia a que en su estudio obtuvo muestras de muchos más tejidos. «Esto cambia completamente las cosas», afirma. «Significa que el genoma tiene una faceta horaria.»

Imaginemos el cuerpo como una máquina muy complicada, con miles de adminículos cuyos engranajes, cestos y muelles deben quedar correctamente alineados en un momento para que prosiga la vida. Pero resulta que no hay momento en el que estén presentes todos a la vez. Si ponemos una canica en la rampa, el camino que seguirá por la mañana será diferente al que recorrerá por la tarde.

El conductor de toda esta expresión programada es el reloj circadiano, que no es un único objeto o lugar del cerebro, como su nombre podría hacer pensar, sino un pelotón formado por docenas de proteínas. Al mismo tiempo que algunos investigadores descubrían ciclos en la expresión génica, otros ponían de manifiesto la faceta circadiana del misterio. Ahora sabemos que, a lo largo del día, la cantidad de esas proteínas

aumenta y disminuye gracias a las directrices emitidas por una región del cerebro sensible a la luz: el marcapasos circadiano. Las proteínas circadianas ayudan a organizar la expresión de los demás genes que siguen el ciclo diario, al pulsar los botones y empujar las palancas que activan unas proteínas y desactivan otras, con lo que lo regulan todo, de la división celular al metabolismo. Están presentes en casi cada célula del organismo.

La importancia de este trabajo sigue creciendo. El premio Nobel de fisiología o medicina de 2017 fue a parar a tres investigadores del reloj circadiano: descubrieron una proteína clave de dicho reloj que se acumula en las células durante la noche, se degrada durante el día y actúa como una especie de cigüeñal para la maquinaria completa. Los hallazgos de estos investigadores dan a entender que en el organismo hay momentos del día buenos y otros malos para hacer cualquier cosa, sobre todo cuando se trata de un procedimiento médico. Pero ¿cuáles son estos momentos?

¿VENENO O CURA?

El fármaco paracetamol es un peligro disfrazado, a pesar de ser un analgésico para los usos más inocentes, como cefaleas o agujetas. Cuando se toma en exceso, puede dañar el hígado de tal forma que el paciente podría morir en unos días si no recibe tratamiento. La sobredosis de paracetamol ocasiona más de 78.000 visitas anuales a urgencias solo en los EE.UU.

¿Podría ocurrir que parte de la mortalidad asociada al paracetamol tuviera que ver con el momento en el que se toma? Así es, como han comprobado Robert Dallmann, cronofarmacólogo de la Universidad de Warwick, y sus colaboradores en estudios con ratones: cuando les administraban una dosis peligrosamente elevada por la mañana, no les perjudicaba en absoluto; pero, según Dallmann, «si se lo dábamos al atardecer, el hígado quedaba básicamente destruido».

La explicación es que cuando las dos proteínas centrales del reloj, denominadas CLOCK y BMAL1, siguen su ciclo diario en el hígado, pulsan un interruptor que hace que se sintetice la DBP, que a su vez hace que se exprese la enzima POR, la cual actúa sobre otra molécula que conocen muy bien los farmacólogos: el citocromo CYP2E1, una de las enzimas hepáticas encargadas de degradar los fármacos, el alcohol y las sustancias de los alimentos. En el hígado, la cantidad de estas enzimas aumenta por la mañana en los humanos y por la noche en los ratones, que tienen hábitos nocturnos. Schibler sugiere que las enzimas se preparan para el momento en el que el organismo tiene más probabilidades de comer.

La POR transfiere un electrón a CYP2E1. Si la persona —o el ratón— ingiere el paracetamol, CYP2E1 se fija a la molécula del fármaco. Una serie de cambios pequeños y veloces (introduce una molécula de oxígeno mientras manipula con destreza los protones y otro electrón) dan lugar a la liberación de agua y a un fragmento de lo que era paracetamol, que ahora se ha convertido en un veneno muy peligroso.

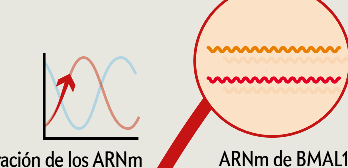
La mayor parte del tiempo, el veneno tiene una vida corta porque, a medida que el citocromo lo libera, lo atrapa otra enzima que lo degrada en algo inocuo gracias a un antioxidante. Pero resulta que la producción de este antioxidante también esta gobernada por el reloj circadiano. Si el paracetamol llega cuando el citocromo está presente pero no hay suficiente antioxidante para encargarse de él, el veneno se acumula y sobreviene el desastre. Esta zona de peligro aparece por la tarde en los ratones, mientras que, en los humanos, si se siguen los mismos principios biológicos, se produce por la mañana.

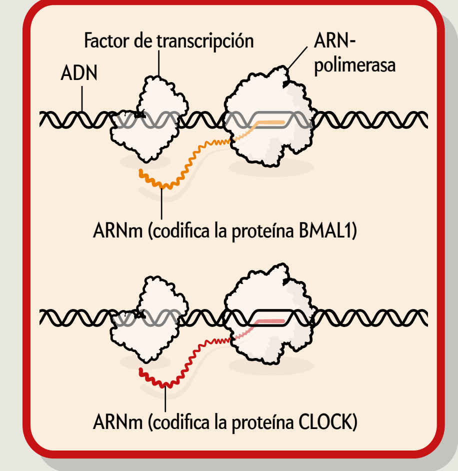
ASÍ FUNCIONA UN RELOJ CELULAR

Los ritmos de un hepatocito

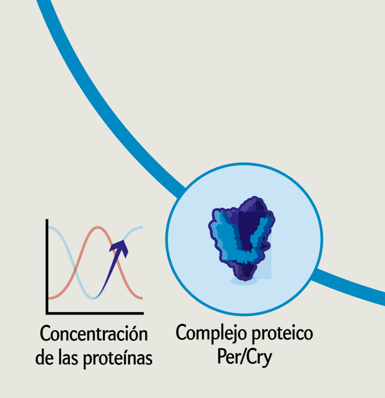
Los relojes circadianos son antiguos. Podrían no serlo tanto como la propia vida, pero grupos tan dispares como las plantas, las bacterias y los mamíferos presentan sistemas de cronometraje que les permiten responder a los ciclos diarios del planeta. En los mamíferos, una región del cerebro, el núcleo supraquiasmático, actúa como un marcapasos circadiano sincronizado con la luz solar. Esto ayuda a poner en hora los relojes celulares que marcan el ritmo de casi todas las células del organismo, incluidos los hepatocitos (mostrados aquí). Dentro de cada uno, dos proteínas centrales del reloj, BMAL1 y CLOCK, desencadenan la expresión de muchas otras, lo que activa un bucle de retroalimentación diario que inhibe la cantidad de BMAL1 y CLOCK antes de dejarlas aumentar de nuevo.

Hepatocito de ratón

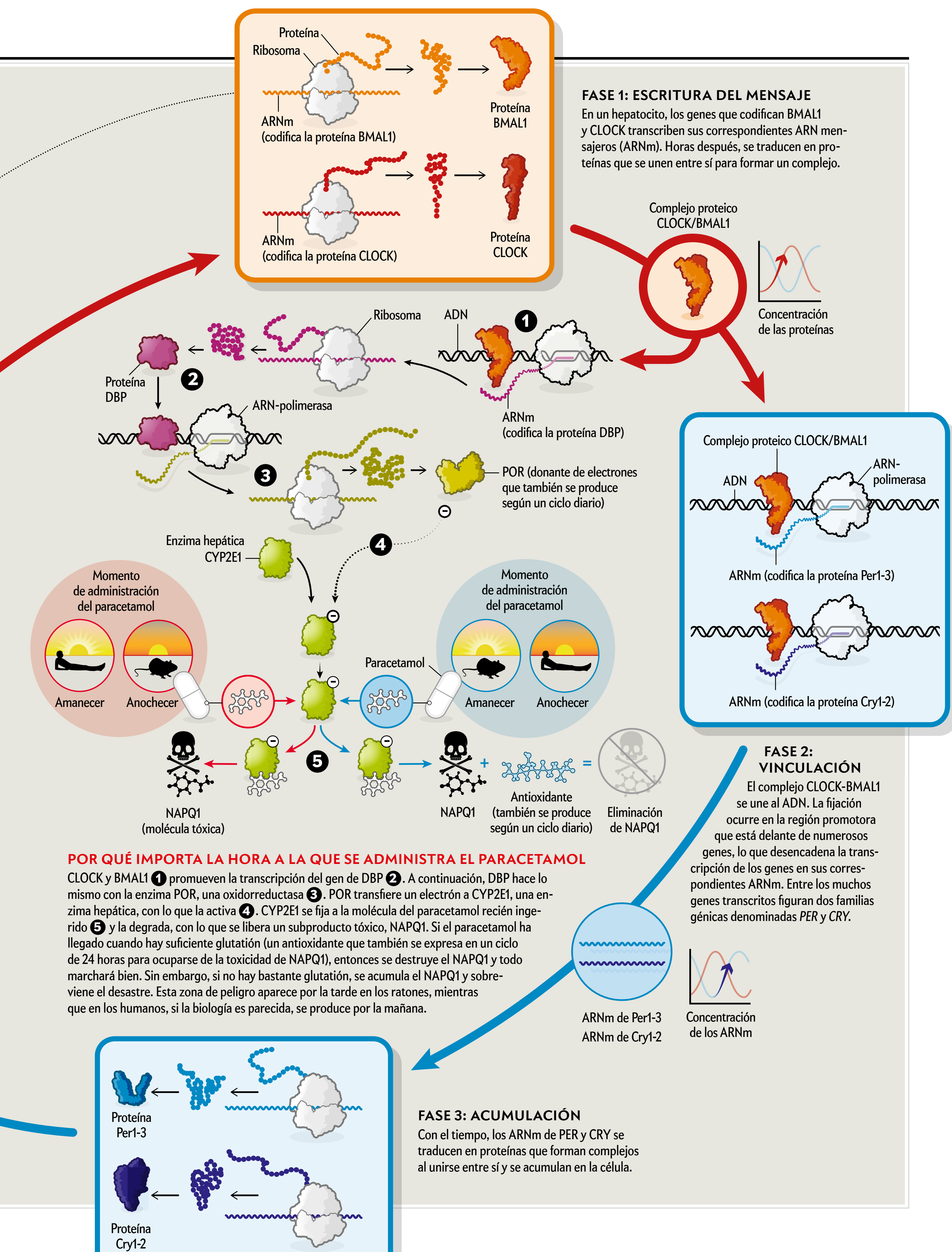




FASE 4: DESPLIEGUE
El complejo PER-CRY inhibe a CLOCK y BMAL1, lo que significa que la producción de PER y CRY acaba decayendo, en un bucle de retroalimentación negativa. Sin ellas, ya no se reprimen ni CLOCK ni BMAL1, con lo que se transcribirán de nuevo.



TAMI TOLPA


Proteína
Ribosoma
ARNm
(codifica la proteína BMAL1)
Proteína
BMAL1
ARNm
(codifica la proteína CLOCK)
Proteína
CLOCK
FASE 1: ESCRITURA DEL MENSAJE
En un hepatocito, los genes que codifican BMAL1 y CLOCK transcriben sus correspondientes ARN mensajeros (ARNm). Horas después, se traducen en proteínas que se unen entre sí para formar un complejo.
Complejo proteico
CLOCK/BMAL1
Concentración
de las proteínas
Ribosoma
ADN
1
Proteína
DBP
2
ARN-polimerasa
ARNm
(codifica la proteína DBP)
3
POR (donante de electrones
que también se produce
según un ciclo diario)
Enzima hepática
CYP2E1
4
Momento
de administración
del paracetamol
Amanecer
Anochecer
Paracetamol
Momento
de administración
del paracetamol
Amanecer
Anochecer
5
NAPQ1
(molécula tóxica)
NAPQ1
Antioxidante
(también se produce
según un ciclo diario)
Eliminación
de NAPQ1
Complejo proteico CLOCK/BMAL1
ADN
ARN-
polimerasa
ARNm (codifica la proteína Per1-3)
ARNm (codifica la proteína Cry1-2)
FASE 2:
VINCULACIÓN
El complejo CLOCK-BMAL1 se une al ADN. La fijación ocurre en la región promotora que está delante de numerosos genes, lo que desencadena la transcripción de los genes en sus correspondientes ARNm. Entre los muchos genes transcritos figuran dos familias génicas denominadas *PER* y *CRY*.
POR QUÉ IMPORTA LA HORA A LA QUE SE ADMINISTRA EL PARACETAMOL
CLOCK y BMAL1 1 promueven la transcripción del gen de DBP 2. A continuación, DBP hace lo mismo con la enzima POR, una oxidorreductasa 3. POR transfiere un electrón a CYP2E1, una enzima hepática, con lo que la activa 4. CYP2E1 se fija a la molécula del paracetamol recién ingerido 5 y la degrada, con lo que se libera un subproducto tóxico, NAPQ1. Si el paracetamol ha llegado cuando hay suficiente glutatión (un antioxidante que también se expresa en un ciclo de 24 horas para ocuparse de la toxicidad de NAPQ1), entonces se destruye el NAPQ1 y todo marchará bien. Sin embargo, si no hay bastante glutatión, se acumula el NAPQ1 y sobreviene el desastre. Esta zona de peligro aparece por la tarde en los ratones, mientras que en los humanos, si la biología es parecida, se produce por la mañana.
ARNm de Per1-3
ARNm de Cry1-2
Concentración
de los ARNm
Proteína
Per1-3
Proteína
Cry1-2
FASE 3: ACUMULACIÓN
Con el tiempo, los ARNm de PER y CRY se traducen en proteínas que forman complejos al unirse entre sí y se acumulan en la célula.

Sorprendentemente, la destrucción del reloj elimina las diferencias letales entre la mañana y la noche. «Es posible demostrar que, si paramos el reloj en el hígado, desaparece este ritmo», afirma Dallmann. En estas células sin reloj, los genes se expresan más desorganizados. Tendríamos entonces una complicada máquina en la que casi todos los elementos funcionan a la vez, en una cacofonía genética que probablemente no logre mantenerse durante mucho tiempo si se pretende que el animal siga sano. Pero el experimento con los ratones demuestra que el reloj circadiano resulta clave para los efectos del fármaco.

INFLUENCIA CIRCADIANA SOBRE LOS FÁRMACOS MÁS CORRIENTES

Si la mayor parte del genoma fabrica proteínas solo a determinadas horas del día y si los fármacos interaccionan con dichas sustancias, entonces la hora a la que se administran resultará importante para otros medicamentos, además del paracetamol. De hecho, 56 de los 100 fármacos más consumidos en los EE.UU. actúan sobre proteínas que se expresan de forma rítmica, según describieron Hogenesch y sus colaboradores en un artículo de 2014. Casi la mitad de estos medicamentos tienen una semivida en el organismo de menos de seis horas, lo que hace pensar que su eficacia podría variar según el momento en el que se administren. Por ejemplo, la semivida de la aspirina recetada como protección contra los infartos de miocardio es muy breve. Pero en el mencionado artículo se demostró que la enzima sobre la que actúa muestra un ciclo diario en tejidos del corazón, del pulmón y del riñón. Quizás ese perfil explique los resultados de un ensayo de 2015 en pacientes hipertensos, en el que se demostró que la aspirina antes de acostarse disminuía la tensión arterial, mientras que si se tomaba por la mañana, la aumentaba ligeramente. Un estudio aleatorizado más pequeño con humanos reveló en 2014 que la aspirina antes de acostarse hacía disminuir la actividad de un tipo de células sanguíneas que da lugar a los coágulos, mientras que no ocurría si se tomaba por la mañana.

Además de explorar la influencia circadiana en los medicamentos más corrientes, muchos investigadores que ahora están interesados en lo que se conoce como cronomedicina (programar la hora del tratamiento para que la eficacia y la seguridad sean máximas) se han centrado en algunos fármacos particularmente peligrosos: los utilizados para tratar el cáncer. Las quimioterapias provocan efectos secundarios potentes y daños permanentes en algunos pacientes. Los procesos bioquímicos que crean estos efectos secundarios tienen algo en común con lo que le sucede al paracetamol. Al igual que este, algunas quimioterapias interaccionan con enzimas hepáticas que están bajo el control circadiano, con lo que su eficacia algunas veces parece depender de la hora del día en la que se administran. Hace décadas que Halberg y sus colaboradores descubrieron que la vida o la muerte de los ratones con cáncer dependía de la hora en la que recibían el medicamento, según nos cuenta Germaine Cornelissen, de la Universidad de Minnesota, que empezó a trabajar con él poco después.

Francis Levi, cronobiólogo y oncólogo en la Universidad de Warwick, y sus colaboradores llevan más de veinte años sometiendo a prueba esta idea. En un estudio de referencia, se fijaron en lo que les sucedía a 93 pacientes con cáncer colorrectal cuando tomaban la medicación a una hora concreta. En las células humanas, la enzima dihidropirimidina-deshidrogenasa es responsable de degradar el fluorouracilo (un quimioterápico) de manera segura. La concentración de la enzima aumenta casi el 40 por ciento hacia la medianoche. Los investigadores proponen que, si los pacientes pudieran tomar el fármaco entonces, tendrían menos efectos secundarios dolorosos y peligrosos. De hecho, hallaron que la inflamación de las membranas mucosas era cinco veces menor y que las hospitalizaciones por las reacciones adversas se reducían a un tercio.

¿Entraremos algún día en la consulta del médico conociendo los detalles de nuestro propio reloj, del mismo modo que conocemos nuestro grupo sanguíneo? ¿Nos darán una tarjeta de horarios personalizada para saber cuándo tomar los medicamentos?

En otro ensayo, el equipo halló que los hombres con cáncer colorrectal sobrevivían más tiempo con un tratamiento horario, pero no así las mujeres. Según Levi, «[el hallazgo] no significa que las mujeres no se beneficien de la cronoterapia, sino que la programación tiene que ser diferente entre ambos sexos». Con este fármaco concreto, resultaba que, al menos en los ratones, las proteínas del reloj de las hembras llevaban un ritmo lo suficientemente distinto del de los machos como para hacer que el mejor momento para administrárselo a unos y otras variara en algunas horas. Levi y sus colaboradores han desarrollado, en colaboración con una compañía de productos biosanitarios, bombas que inyectan una dosis a una hora determinada, incluso aunque el paciente o el médico estén dormidos.

Si estos datos llevan décadas publicados, ¿por qué la cronomedicina no está más implantada en la práctica clínica? Por una razón: este efecto no aparece en todos los ensayos. Es difícil decidir si es porque los experimentadores no contemplaron suficientes horas del día o alguna otra variable, o porque simplemente no se gana nada programando una dosis. La mayor parte del tiempo que Levi y otros pioneros dedicaron al estudio de esta cuestión, seguían sin estar definidos los detalles sobre el funcionamiento del reloj circadiano y cómo influía exactamente en lo que ocurría después de tomar un fármaco.

Los nuevos descubrimientos podrían alzar las expectativas del campo. En marzo, investigadores de China y de EE.UU. esbozaron el funcionamiento del reloj circadiano en 32 tipos de cáncer. En otro artículo reciente, Hogenesch y sus colaboradores hallaron que la administración de un quimioterápico a la hora correcta, cuando las enzimas consiguen evacuar los subproductos peligrosos, reduce a la mitad su toxicidad en los ratones.

Mientras tanto, se siguen acumulando pruebas que apoyan el tratamiento horario para otras enfermedades, incluidas las inflamatorias y autoinmunitarias, como la artritis reumatoide,

cuyos pacientes llevan mucho tiempo quejándose de molestia e hinchazón articulares por la mañana. Ahora sabemos que el reloj circadiano acciona la inflamación articular en este momento, según nos cuenta Julie Gibbs, de la Universidad de Manchester, que estudia el fenómeno. También nos informa del sorprendente éxito obtenido por otro grupo en un ensayo clínico de un fármaco programado para que se liberara antes de despertar. Incluso la barrera hematoencefálica podría ser más permeable a determinadas horas: Amita Sehgal y su laboratorio en la Universidad de Pensilvania acaban de informar que, en sus experimentos con la mosca de la fruta, los anticonvulsivos son más eficaces por la noche porque las bombas moleculares que extraen el fármaco del cerebro se expresan con un perfil cíclico.

Gracias a un número cada vez mayor de artículos sobre el reloj circadiano, este campo de investigación ya no sigue el método de ensayo y error. «Los éxitos de los últimos cuarenta años han sido más bien fortuitos», comenta Hogenesch. «Ahora ya contamos con estrategias basadas en los mecanismos y sus fundamentos.» En otras palabras, los estudios pueden planificarse teniendo en cuenta que el cuerpo sigue un horario.

POSIBILIDADES PARA LA MEDICINA PERSONALIZADA

Las compañías farmacéuticas y los médicos no han respondido, al menos todavía, con el mismo entusiasmo que los científicos. La comprobación de los mecanismos moleculares descubiertos en los animales ha tardado en arrancar en los humanos. Además, la cronobiología no suele estudiarse en las facultades de medicina, lo que significa que quienes podrían utilizar razonablemente esta información apenas la conocen. Desde la perspectiva de las compañías farmacéuticas, la influencia de la hora del día es una cuestión costosa de estudiar. Imaginémonos realizando el doble de ensayos solo para observar si la mañana y la noche tienen efectos diferentes, por no mencionar las horas entre ellas.

Para complicar más las cosas, algunas pruebas indican que el mejor momento para administrar un fármaco varía mucho de una persona a otra. Aunque todas sigan aproximadamente un mismo programa, algunas responden más tarde y otras más pronto. Cornelissen y sus colaboradores en Japón han descubierto que, en los pacientes hipertensos, el análisis personalizado de los ritmos circadianos puede revelar distintos momentos óptimos en que cada uno reciba el tratamiento. En los estudios de Levi sobre el cáncer también queda demostrada la importancia de examinar el ciclo diario de cada paciente. Este nivel de detalle parece apabullante.

Las compañías farmacéuticas ya se han topado antes con el reloj circadiano. Según Levi, en los años ochenta del siglo xx, una de ellas intentó reducir las reacciones adversas estomacales de un antiinflamatorio mediante la introducción de una formulación de liberación prolongada, y fue un completo desastre. A pesar del esfuerzo de la compañía, la frecuencia de los acontecimientos adversos graves no disminuyó. Le pidieron a Levi un ensayo con unos 500 pacientes y descubrió que el fármaco era muy tóxico por la mañana, cuando se había decidido que había que tomar la nueva formulación, probablemente como resultado del perfil cíclico de las enzimas hepáticas. La comprobación de tales efectos antes de comercializar cualquier fármaco podría ser una manera de evitar tales meteduras de pata, así como de mejorar, posiblemente, su eficacia.

De hecho, la variación individual podría dejar de ser un inconveniente y convertirse en una oportunidad para las compañías farmacéuticas. La medicina personalizada (la idea de que el tratamiento puede adaptarse a cada paciente) se halla en auge, y el objetivo de incorporar el reloj encaja con ella. Si se eliminan los efectos secundarios en un grupo de personas al asignarles la hora adecuada o al darles una formulación que solo entrará en acción más tarde, supondrá un beneficio neto para la farmacéutica. Con ese fin, cada vez es más fácil conocer en qué momento del ciclo diario se halla una persona mediante pruebas simples y no invasivas. Hogenesch, por ejemplo, está investigando una prueba basada en las células recogidas con una torunda de algodón frotada en la piel de un paciente.

¿Entraremos algún día en la consulta del médico conociendo los detalles de nuestro propio reloj, del mismo modo que conocemos nuestro grupo sanguíneo? ¿Nos darán una tarjeta de horarios personalizada para saber cuándo tomar los medicamentos? Las respuestas varían, pero Schibler confía en que acabará siendo así.

Si pudiéramos volver atrás en el tiempo hasta el monje asmático del monasterio, los neumólogos modernos podrían explicarle que una razón por la que sus ataques tienden a producirse de madrugada es que a esa hora aumentan ciertas hormonas que siguen el ritmo circadiano. Encogen las vías pulmonares y desencadenan una crisis en algunos asmáticos. Hoy día, un fármaco, la teofilina, reduce dicho efecto si se toma antes de acostarse en una cápsula que se disuelve con el tiempo para que haya teofilina en la sangre cuando se la necesite, horas después. Más de 1500 años después de que Caelius Aurelianus describiese que el asma llegaba de noche, tenemos algunas respuestas sobre la hora y el organismo, así como nuevos misterios que resolver. IyC

PARA SABER MÁS

Chronopharmacology: New insights and therapeutic implications. Robert Dallmann et al. en *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, vol. 54, págs. 339-361, enero de 2014.

A circadian gene expression atlas in mammals: Implications for biology and medicine. Ray Zhang et al. en *Proceedings of National Academy of Sciences USA*, vol. 111, n.º 45, págs. 16.219-16.224, 11 de noviembre de 2014.

Diurnal transcriptome atlas of a primate across major neural and peripheral tissues. Ludovic S. Mure et al. en *Science*, vol. 359, art. eaao0318, 16 de marzo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuestros relojes internos. Keith C. Summa y Fred W. Turek en *IyC*, septiembre de 2015.

Relojes internos desajustados. Henrik Oster en *MyC* n.º 86, 2017.

Tome su medicamento... ahora. Mark Fischetti, *en este mismo número*.

por Miquel Canals

El regreso de la vida después de una erupción

En las aguas sulfhídricas próximas al volcán submarino de El Hierro ha surgido un peculiar ecosistema microbiano

Una erupción volcánica es tan devastadora en el mar como en tierra. La que se desencadenó el 10 de octubre de 2011 al sur de la isla de El Hierro, a una profundidad de 363 metros, duró 147 días. En ese tiempo se formó un nuevo volcán submarino, el Tagoro, que fue creciendo a razón de casi 2 metros diarios, hasta alcanzar 274 metros de altura. La erupción provocó un aumento brusco de la temperatura y la turbidez de las aguas, un descenso de la concentración de oxígeno y la expulsión masiva de dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S), acabando con todo signo de vida. La superficie del mar se tiñó de vivos colores debido a las partículas y los metales disueltos expulsados por el volcán.

En octubre de 2014, nuestro equipo visitó el Tagoro con un vehículo submarino teleoperado (ROV, de *remotely operated vehicle*). La sorpresa fue que el lecho marino cercano a la cima del volcán estaba cubierto por un tapiz blanco como la nieve. Superada la primera impresión, nos aprestamos a filmarlo y muestrearlo. Su aspecto en forma de pequeños filamentos meciéndose suavemente nos llevó a llamarlos «cabellos de Venus». El organismo más abundante que los componía era una bacteria sulfooxidante de un género y una especie nuevos. Fue bautizada como *Thiolava veneris*, del griego *thio*, referido al azufre como sustrato metabólico clave, del latín *lava*, referido al tipo de fondo donde se halló, y del latín *veneris*, que es el genitivo de Venus.

Visualmente muy llamativos, los cabellos de Venus están formados por filamentos pluricelulares de unos centímetros de longitud y de entre 3 y 6 micras de diámetro, envueltos en vainas de entre 30 y 90 micras de diámetro. Nuestro equipo recuperó también numerosos genes de otros organismos, tanto procariotas como eucariotas. Estos últimos eran muy diversos e incluían meiofauna (pequeños invertebrados de entre 30 y 1000 micras) y estadios larvales y juveniles de organismos bentónicos de mayor tamaño. Todo ello significa que las bacterias de los cabellos de Venus, alimentadas por el sulfhídrico que sigue escapando del volcán, son los productores primarios, en la base de la cadena trófica, de un ecosistema que está naciendo después de la devastación. ¡La vida vuelve a triunfar!

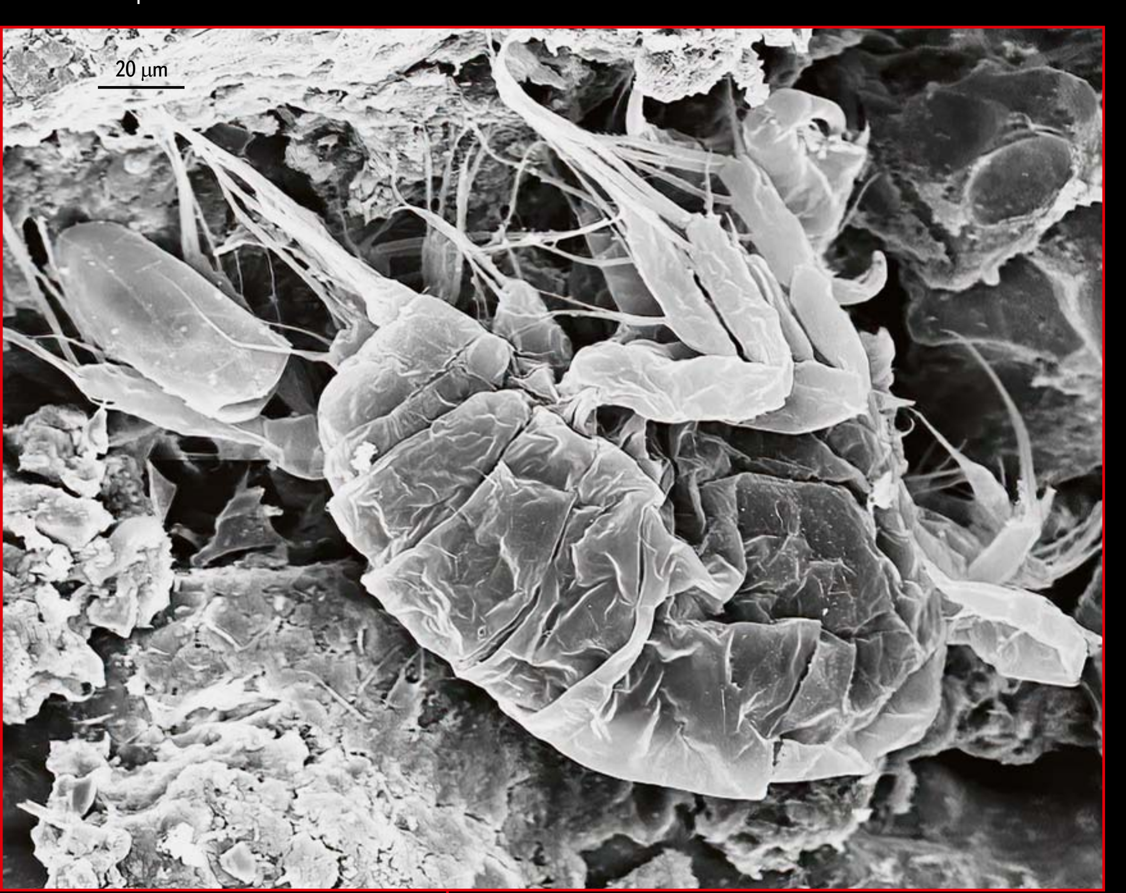
—Miquel Canals
Grupo de Investigación en Geociencias Marinas
Universidad de Barcelona



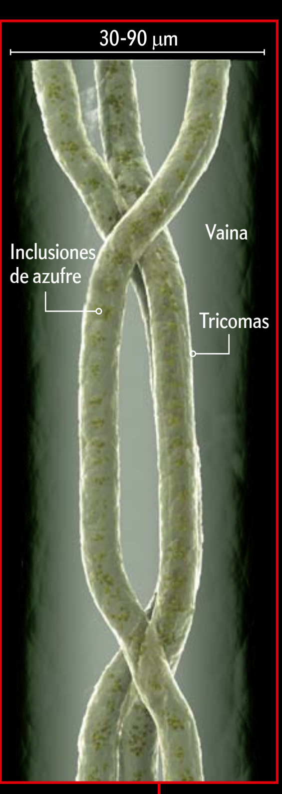


Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

ESTE METAZOO es uno de los representantes de la diversa meiofauna que se desarrolla entre los cabellos de Venus.



CADA CABELLO está formado por un tricoma multicelular de la bacteria *Thiolava veneris*, envuelto por una vaina. En la superficie del tricoma se observan inclusiones de azufre.





ENTRE LAS AGUAS TEÑIDAS por la erupción se distingue la posición del cráter del nuevo volcán Tagoro (*mancha ovalada marrón*). En la esquina superior derecha asoman las costas de Orchilla, en el extremo suroccidental de El Hierro **a**. Sobre los depósitos de lava submarinos se han observado unos tapices filamentosos blancos **b**. Denominados «cabellos de Venus», corresponden a bacterias que crecen en el ambiente hostil de las aguas sulfhídricas **c**.

por Jennifer Rampling



Jennifer Rampling enseña historia de la ciencia de la Edad Moderna en la Universidad de Princeton.

La prehistoria de la tabla periódica

Más de 2000 años de ideas y teorías sobre la indivisibilidad y la naturaleza última de la materia

Este año se celebra el Año Internacional de la Tabla Periódica. Dos milenios antes de que los científicos la concibieran, los filósofos de la antigüedad se preguntaban ya por la naturaleza de la materia. ¿Eran todas las sustancias reducibles a una única materia universal? De ser así, ¿cómo se distinguía una sustancia de otra? Desde la Grecia clásica hasta la Europa del Renacimiento, los sucesivos intentos por responder a estas preguntas generaron una profusión de conceptos coexistentes, desde elementos a principios, pasando por átomos o corpúsculos. Al intentar resolver un problema específico, cada uno de ellos creaba nuevas dificultades.

En el siglo IV a.C., Aristóteles trató el problema en su *Física*: ¿cuántas veces podemos dividir una pieza de oro hasta que deja de ser oro? Intuyó que la materia no puede subdividirse más allá de cierto nivel de simplicidad sin perder el carácter que la define. Este es el «mínimo natural», la partícula más pequeña de cualquier sustancia que podemos identificar como tal. Si fuera más pequeña, ya no tendría las características que hacen que el oro sea oro, por ejemplo.

Un razonamiento similar se halla en la base de la concepción moderna del átomo como unidad fundamental de los elementos químicos. Pero dichas analogías pueden ser equívocas. Aristóteles atacó la teoría de los «átomos» indivisibles de Demócrito por su imposibilidad matemática. Las sustancias no tenían una estructura atómica, sino que se componían de materia y forma. La forma imprimía la materia, que constaba, a su vez, de cuatro «elementos»: tierra, agua, fuego y aire.

Primeros principios

Aristóteles no fue el primer filósofo que trató de conceptualizar un sistema de elementos. Empédocles, filósofo presocrático, ya lo había intentado en el siglo V a.C. Sus elementos incluían un sustrato material subyacente al mundo de las formas, inaccesible a nuestros sentidos. Aunque elementales, eran divisibles y constaban de dos pares de cualidades contrarias: caliente/frío y húmedo/seco. Un elemento se transformaba en otro cuando se alteraban sus propiedades. Así, conforme el calor desplaza al frío, el agua (fría y húmeda) se transforma en aire (caliente y húmedo). En la cosmología aristotélica, esta capacidad de cambio, intrínseca a la física terrestre, explica la complejidad y diversidad de los elementos.

Este modelo mantuvo su prestigio hasta el final de la Edad Media, erigiéndose en fundamento de la filosofía natural islámica y cristiana. No obstante, no podía explicar ciertas observaciones químicas. La transformación de una forma sustancial en otra debería ser un proceso irreversible: el vino se pica en vinagre pero el vinagre no puede volver a transformarse en vino. Aun así, como bien sabían los filósofos y aquellos que manipulaban los metales, muchas operaciones eran reversibles. Tras ser disuelta en ácido nítrico, es posible recuperar la plata pura; también el mercurio puede ser recuperado tras su transformación en un precipitado rojo.

Los alquimistas adoptaron una posición intermedia, inspirada por el tratado aristotélico *Acerca del cielo. Meteorológicos*. La teoría del «azufre-mercurio», formulada en los textos

PERSONIFICACIÓN de los principios del mercurio y el azufre, siglo XVI.

árabes alquímicos del siglo VIII que se atribuyen a Jābir ibn Hayyān, iba a dominar durante cinco siglos las teorías sobre la generación metálica. En el siglo XII fue traducida al latín junto con otros textos científicos árabes.

La teoría se basa en dos principios emparejados, azufre y mercurio, que no siempre se corresponden con los elementos del mismo nombre. El mercurio es frío y húmedo; el azufre, caliente y seco. Su combinación genera los siete metales principales: oro, plata, bronce, estaño, hierro, plomo y mercurio. Los dos principios representan un estadio intermedio de la materia. Están compuestos por los cuatro elementos, pero poseen cualidades que determinan las de los metales. El hierro, por ejemplo, funde a altas temperaturas y desprende chispas al ser golpeado. Según la teoría, debe contener en una elevada proporción el principio caliente y seco del azufre.

De modo análogo a la transmutación alquímica, la medicina ofreció un contexto para pensar las estructuras de la materia, particularmente a partir del siglo XVI. En su *Opus Paramirum*, el médico reformista suizo Paracelso (1493–1541) añadió a la díada azufre-mercurio un tercer principio, la sal. Afirmó que estas «tres primeras cosas» subyacían a toda la materia, no solo los metales. En el marco de una cultura profundamente religiosa, esta tríada se correspondía, convenientemente, a la Trinidad cristiana de Padre, Hijo y Espíritu Santo.

Paracelso no propuso una forma universal de la materia. Argumentó que toda sustancia se podía reducir a formas particulares de azufre, mercurio y sal. La sal de la madera no es la misma que la del oro y, por lo tanto, tienen propiedades farmacológicas distintas. El sistema atendía básicamente a las necesidades de los profesionales médicos. En cambio, la filosofía mecánica del siglo XVII trataría de justificar las transformaciones de la materia a partir de la interacción mecánica entre corpúsculos. El filósofo natural y sacerdote francés Pierre Gassendi intentó incorporar el atomismo antiguo a la tradición cristiana, mientras que René Descartes propuso un universo mecánico formado por un continuo de partículas puntuales.

En la práctica, un químico podía seleccionar ciertos aspectos de todos estos sistemas en apariencia contradictorios. El médico flamenco Jan Baptista van Helmont (1580–1644) explicó en términos mecanicistas cómo los metales se disolvían en ácidos minerales, reduciéndose a partes más pequeñas. Pese a criticar la medicina paracelsiana, acusó también la influencia de la noción de principios de Paracelso. Pero su experiencia práctica le llevó a cuestionar la idea de que el azufre, el mercurio y la sal eran constituyentes de todas las sustancias, considerando, en cambio, que eran meros productos de procesos químicos o metalúrgicos.

La química, la medicina y la filosofía mecánica contribuyeron a resolver el problema de la materia durante la Edad Moderna

El punto de vista de Van Helmont influyó, a su vez, en Robert Boyle, miembro fundador de la Real Sociedad y defensor del mecanicismo, que expresó dudas similares en *El químico escéptico* (1661). Boyle equiparó elementos y principios en una definición deliberadamente ambigua: «Cuerpos primitivos y simples que forman los cuerpos mixtos o compuestos, y en los cuales pueden resolverse finalmente». Rechazó los principios paracelsianos como constituyentes físicos de los cuerpos compuestos, y no halló indicio alguno de la sal de Paracelso. Sin embargo, convencido como estaba de que la transmutación era posible, Boyle estaba dispuesto a considerar la posibilidad de que los metales contuvieran «mercurio» y «azufre», y posteriormente llegó a afirmar que había extraído diversos «mercurios» metálicos él mismo.

Boyle propuso como solución una «materia católica» universal que formaba «corpúsculos» semipermanentes. Estos cuerpos eran las partículas más pequeñas humanamente accesibles, así que su propia composición no podía ser investigada. Los corpúsculos funcionaban como átomos, a la vez que obviaban la objeción matemática de la indivisibilidad. Sin embargo, constituían la sede de propiedades como el tamaño o el movimiento, lo que permitía a Boyle y otros filósofos mecanicistas relacionar las propiedades de los materiales con la textura de sus corpúsculos.

Química, medicina y filosofía mecánica contribuyeron a resolver el problema de la materia. En la década de 1660, la experimentación no bastaba para revelar la estructura íntima de la materia, como bien reconoció Boyle. Dicha estructura no solo era invisible al ojo humano, sino que ni siquiera una técnica avanzada de reciente introducción, como el microscopio, podía desvelarla. Estos retos facilitaron la innovación teórica, permitiendo a los filósofos naturales combinar diversos modelos y explicaciones hasta el siglo XVIII. Desde los trabajos de Joseph Priestley en Inglaterra sobre la separación de gases, hasta las ingeniosas balanzas diseñadas por Antoine Lavoisier en Francia, este pluralismo propició la creación teórica y el desarrollo experimental, a partir de los cuales emergería una nueva visión de la estructura atómica. IyC

Artículo original publicado en *Nature* vol. 565, págs. 563-564, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The aspiring adept: Robert Boyle and his alchemical quest. Lawrence M. Principe. Princeton University Press, 1998.

Elements, principles and corpuscles: A study of atomism and chemistry in the seventeenth century. Antonio Clericuzio. Kluwer Academic Publishers, 2000.

Alchemy tried in the fire: Starkey, Boyle, and the fate of Helmontian chemistry. William R. Newman y Lawrence M. Principe. University of Chicago Press, 2002.

Atoms and alchemy: Chemistry and the experimental origins of the scientific revolution. William R. Newman. University of Chicago Press, 2006.

Alchimie et paracelsisme en France à la fin de la Renaissance (1567-1625). Didier Kahn. Librairie Droz, 2007.

por César Fernández-Quintanilla

César Fernández-Quintanilla es profesor de investigación del Instituto de Ciencias Agrarias del CSIC. Ha participado en diversos comités de expertos de la FAO y ha trabajado para esta organización impartiendo cursos de formación sobre ecología de malezas en numerosos países en desarrollo.



Retos del desarrollo agrícola

Los avances técnicos que permitirían aumentar la productividad de los cultivos topan con el rechazo de una parte de la sociedad

En 1970, Norman Borlaugh recibió el Nobel de la paz por su contribución a la revolución verde. En su discurso de aceptación del premio manifestó que dicha revolución había supuesto un éxito en la lucha contra el hambre, pero alertó de que, si no se limitaba de alguna forma el crecimiento de la población, ese logro resultaría efímero. En aquel momento no se tenían en cuenta las repercusiones ambientales de la nueva agricultura. En 2005, en un discurso en la Universidad de Granada, Borlaugh se planteaba si sería posible alimentar a la población mundial sin destruir la Tierra. Y afirmaba que la humanidad poseía la tecnología para conseguirlo. Han pasado catorce años y cabe preguntarse cuál es el estado actual de esa cuestión, además de otras que han surgido en torno a ella. ¿El problema del hambre en el mundo es meramente técnico o es más bien económico y político? ¿La agricultura intensiva supone una amenaza para el ambiente? ¿La agricultura ecológica tiene la capacidad de proveer los alimentos necesarios con un menor coste ambiental?

Las estadísticas nos muestran cómo, después de varias décadas de avances en la lucha contra la desnutrición, la tendencia se ha invertido en los últimos tres años. En 2017, el número de personas desnutridas ascendía a 820 millones, una cifra semejante a la de hace casi una década. De acuerdo con recientes declaraciones de José Graziano da Silva, director general de la FAO, los conflictos armados son la causa principal del hambre en el mundo. La incapacidad de reducirla está estrechamente relacionada con la inestabilidad de los Gobiernos y el aumento de la violencia, particularmente en el África subsahariana. El cambio climático es la segunda causa de las crisis alimentarias. Las temperaturas siguen aumentando y son cada vez más extremas. El número de desastres relacionados con el clima extremo (golpes de calor, sequías, inundaciones y tormentas) se ha duplicado desde principios de la década de los noventa. Teniendo en cuenta el origen de esas problemáticas, considero que es responsabilidad de los políticos tomar las medidas necesarias para hacerles frente y mitigar así las hambrunas.

Además, para alimentar a la creciente población deberán abordarse otras cuestiones importantes. Una de ellas guarda relación con la productividad de los cultivos. Aunque los avances de las últimas décadas han favorecido un aumento continuo del rendimiento agrícola en algunas regiones, existe cierta preocupación sobre los límites de esa tendencia en otras. Las cosechas de trigo, por ejemplo, crecen a buen ritmo en países con una productividad tradicionalmente baja, como China, pero parecen haberse estancado en zonas donde los rendimientos ya eran elevados, como Holanda, Gran Bretaña y Francia.



Es indudable la necesidad de continuar avanzando en el desarrollo de sistemas agrícolas más productivos y sostenibles. Con frecuencia se ha considerado que los sistemas ecológicos, que emplean pocos insumos externos (como productos agroquímicos) y alteran poco el ambiente, son más sostenibles que los sistemas intensivos, por lo que podrían representar una solución viable. Sin embargo, estudios recientes muestran que muchos de los sistemas intensivos tienen un coste ambiental menor y, en especial, requieren menos tierra por unidad de producto. Dado que los sistemas ecológicos necesitarían arrebatar al entorno natural más superficie para producir la misma cantidad de alimentos, su expansión implicaría un mayor riesgo para la biodiversidad.

Pero los adelantos técnicos de los que se beneficiarían los sistemas agrícolas intensivos, como la ingeniería genética y los plaguicidas y los fertilizantes de segunda generación, son objeto de una creciente contestación social. Borlaugh ya lo anticipaba: «La cuestión más pertinente hoy en día es si se permitirá a los agricultores adoptar las nuevas técnicas. Los ambientalistas extremos de las naciones ricas parecen hacer todo lo posible para detener el progreso científico». Otro factor que debe tenerse en cuenta es que la población se halla cada vez más concentrada en las ciudades. Alejada del mundo rural, a menudo no es consciente de las dificultades que conlleva producir los alimentos.

Aunque en la actualidad las ciencias agrarias siguen ofreciendo respuestas para aumentar la productividad de los cultivos y combatir el hambre en el mundo, la sociedad actual, desvinculada del mundo agrícola y recelosa de los avances técnicos que pudieran perjudicar el ambiente y la salud humana, tiene serios problemas para aceptar algunos de estos cambios. IyC

PLANETAS

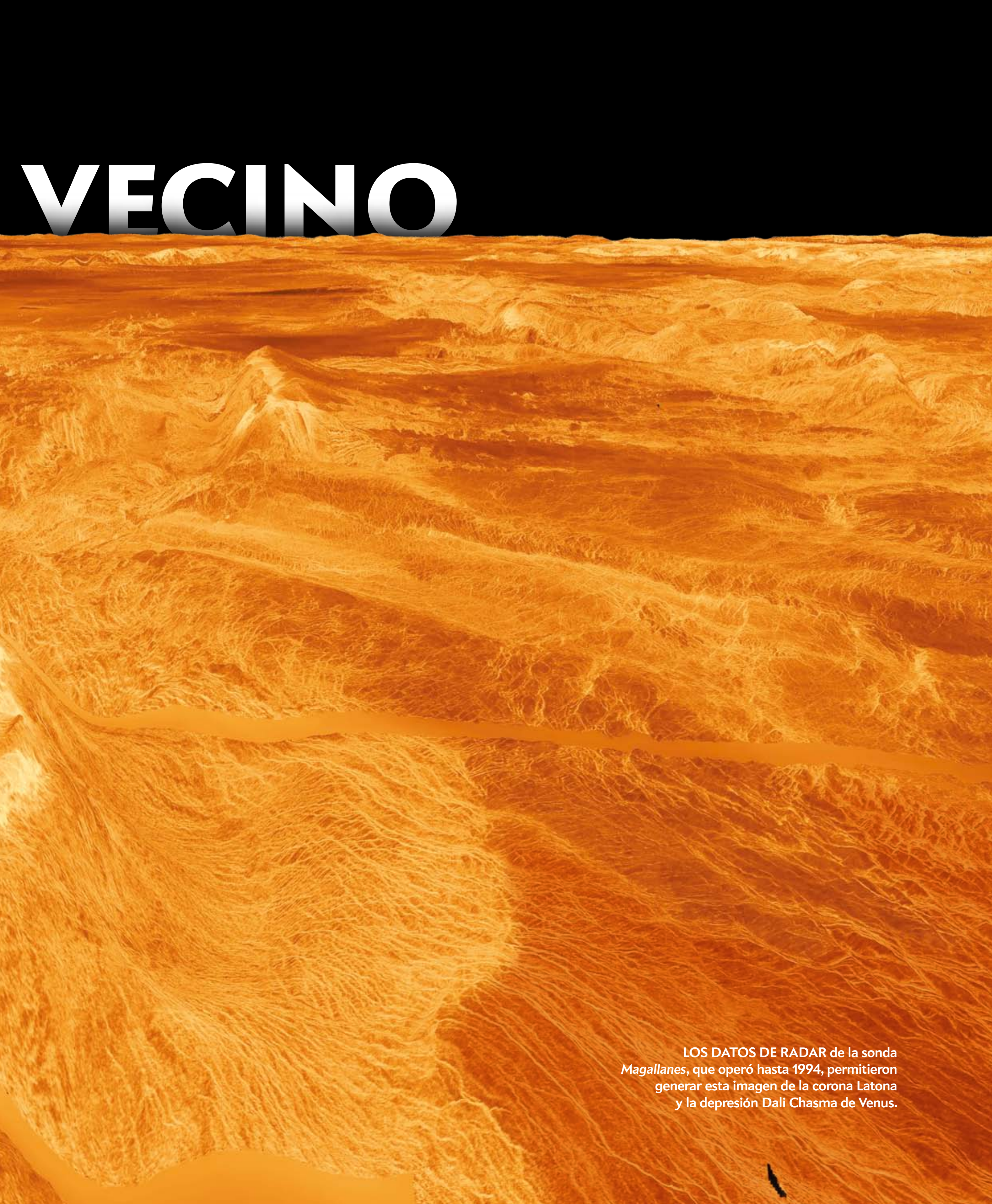
EL EXOPLANETA



¿Qué puede enseñarnos Venus sobre los planetas situados más allá del sistema solar?

M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar y Stephen R. Kane

VECINO

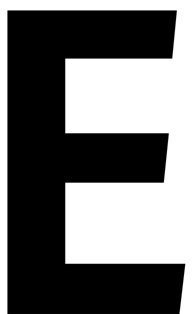


LOS DATOS DE RADAR de la sonda *Magallanes*, que operó hasta 1994, permitieron generar esta imagen de la corona Latona y la depresión Dali Chasma de Venus.

M. Darby Dyar es especialista en espectroscopía mineral y experta en minerales y vidrios procedentes de la Luna, Marte, cometas y asteroides. Es científica sénior en el Instituto de Ciencias Planetarias de EE. UU. y catedrática de astronomía en el Colegio Universitario Mount Holyoke.

Suzanne E. Smrekar estudia las distintas formas en que evolucionan los planetas rocosos y ocasionalmente realiza trabajo de campo en volcanes. Es investigadora principal adjunta de la misión a Marte InSight, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA.

Stephen R. Kane, astrofísico planetario, ha descubierto cientos de exoplanetas y estudia su posible habitabilidad. Es profesor asociado en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de California en Riverside.

N 1982, LA CANCELACIÓN DE LA ÚLTIMA GRAN MISIÓN DE LA NASA, VOIR (RADAR DE Imágenes en Órbita alrededor de Venus), acaparaba las conversaciones en el Departamento de Ciencias Planetarias del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Por entonces, una de las autoras de este artículo (Dyar) hacía allí el doctorado. Los doctorandos lloraban por los pasillos y el personal docente negaba con la cabeza. El Gobierno de Ronald Reagan, recientemente elegido presidente de EE.UU., había aprobado drásticos recortes en exploración espacial, y VOIR se hallaba entre las víctimas.

Sin embargo, los científicos no tardaron en diseñar una nave espacial mucho más barata a partir de material sobrante y, milagrosamente, lograron salvar la misión. En 1989, la sonda *Magallanes* partió hacia Venus, y en 1990 entró en órbita. Durante los cinco años siguientes proporcionó imágenes de radar, datos gravimétricos y un mapa topográfico a escala casi global del segundo planeta más cercano al Sol. Aquella era la última de una larga serie de misiones soviéticas y estadounidenses a nuestro planeta vecino. Pero, cuando *Magallanes* se precipitó sobre la superficie de Venus en 1994, la contribución de la NASA a la exploración de este planeta llegó también a su fin. Desde entonces, los científicos han propuesto más de 25 misiones para regresar allí; pero, aunque algunas han recibido buenas puntuaciones en el proceso de evaluación, ninguna ha sido aprobada. Nuestro conocimiento de la geología de Venus sigue basándose en los datos reunidos hace décadas por la sonda *Magallanes*.

Pero un planetólogo nunca se rinde y, pese a todo, hemos seguido profundizando en los secretos del planeta. Tras *Magallanes*, las agencias espaciales europea y japonesa han enviado exitosas misiones a Venus que han permitido grandes progresos en la comprensión de su atmósfera. Mientras, los científicos han reescrito los libros de texto sobre nuestro planeta hermano a partir de nuevos análisis de los datos de *Magallanes*. Hoy pensamos que los volcanes proliferan en Venus, e incluso hemos hallado indicios de una incipiente tectónica de placas, un proceso que los científicos consideran fundamental para la habitabilidad de un planeta. Nuevos modelos teóricos indican también que Venus podría haber albergado agua líquida en la superficie hasta hace relativamente poco y, por tanto, haber presentado condiciones adecuadas para la vida durante mucho más tiempo del que pensábamos.

Todo ello coincide con otro asombroso avance astronómico: el descubrimiento de miles de exoplanetas en torno a otras

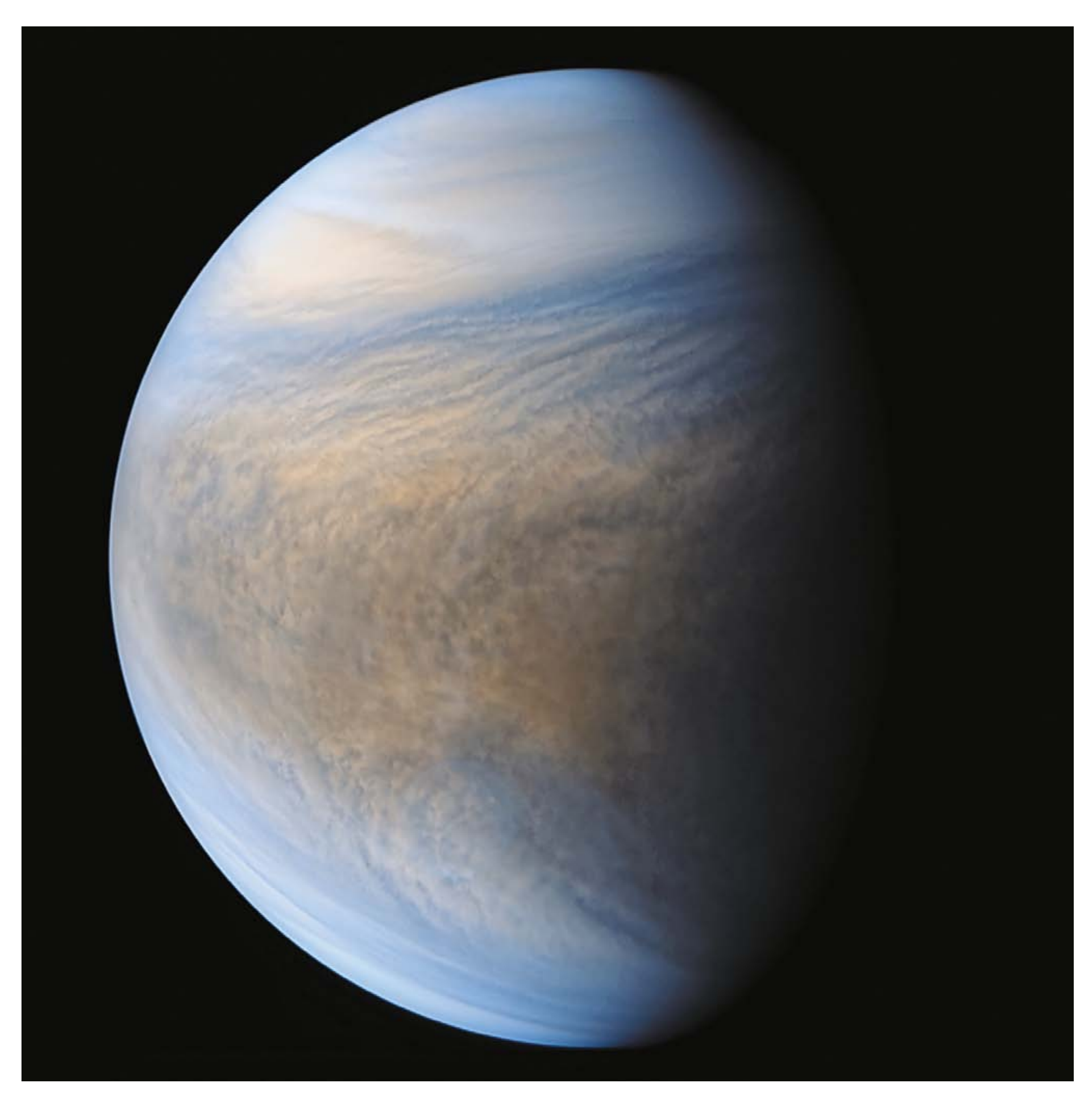
EN SÍNTESIS

La Tierra y Venus comenzaron siendo muy similares. Sin embargo, en cierto momento sus historias comenzaron a divergir. La Tierra conservó los océanos y la atmósfera.

En cambio, la superficie de Venus se volvió inhabitable. Pese a ello, nuestro planeta vecino presenta un vulcanismo activo y signos de una incipiente tectónica de placas.

Entender por qué Venus evolucionó de ese modo podría esclarecer las posibilidades de albergar vida de los numerosos exoplanetas que se parecen a él. Es necesaria una nueva misión a Venus.

PÁGINAS ANTERIORES: NASA Y JPL



LA ATMÓSFERA DE VENUS contiene gruesas nubes de ácido sulfúrico, como muestra esta imagen compuesta creada con los datos de la sonda japonesa *Akatsuki*.

JAXA, ISAS, DARTS Y DAMIA BOUIC

estrellas, muchos de ellos muy similares a Venus en cuanto a su tamaño y distancia orbital. Todo lo que aprendamos sobre nuestro planeta vecino podría ayudarnos a entender mejor esos mundos remotos e inaccesibles. En concreto, si lográramos averiguar si Venus presentó alguna vez las condiciones necesarias para albergar vida y cuándo lo hizo, conoceríamos mejor las probabilidades de encontrar seres vivos en la miríada de cuerpos semejantes a Venus que existen en la Vía Láctea.

SIMILAR A UN EXOPLANETA

La mayoría de esos exoplanetas se han descubierto gracias al «método de los tránsitos», en el que los astrónomos tratan de observar las reveladoras fluctuaciones que se producen en el brillo de una estrella cuando un mundo en órbita pasa por delante de ella [*véase* «Sombras de otros mundos», por Joshua N. Winn; Investigación y Ciencia, mayo de 2018]. Esta técnica permite determinar el tamaño de un planeta lejano. Pero la información que nos da el tamaño es limitada: al fin y al cabo, si un extraterrestre estudiara nuestro sistema solar mediante el método de los tránsitos, Venus y la Tierra parecerían casi idénticos. Sin embargo, Venus no presenta condiciones aptas para la vida, mientras que la Tierra lleva 4000 millones de años siendo habitable.

Para distinguir dos planetas de tamaño similar, podemos medir la distancia que los separa de sus estrellas. La «zona de habitabilidad» es la región alrededor de una estrella donde un

planeta rocoso podría albergar agua líquida en su superficie. La Tierra, obviamente, se halla en esa zona, y pensamos que en el pasado Venus también estuvo en ella durante un período considerable de tiempo. Pero la luminosidad del Sol aumenta con su edad, y eso hace que los límites de la zona de habitabilidad vayan desplazándose hacia el exterior del sistema solar. Actualmente, Venus se encuentra fuera de esa región y orbita en la llamada «zona de Venus», donde las condiciones superficiales son tan tórridas que los océanos de un planeta probablemente se evaporarían debido al efecto invernadero descontrolado de su atmósfera.

Venus y la Tierra se formaron en condiciones muy similares; entre otras, las que dieron origen a los océanos terrestres. Probablemente los impactos de cometas aportaron hielo a la superficie de los dos planetas y el viento solar (la corriente de partículas cargadas emitida por el Sol) creó una fina capa de iones sobre ambos. Y en la época en que Venus y la Tierra eran protoplanetas que crecían a partir del disco primordial de polvo que rodeaba al Sol, ambos incorporaron hidrógeno y otras sustancias volátiles, compuestos químicos que se evaporan con facilidad. Las simulaciones de las etapas iniciales de Venus indican que su superficie podría haber albergado agua en estado líquido antes que la Tierra y que podría haberla tenido hasta hace unos 1000 millones de años.

Hay más razones que nunca para enviar una nueva gran misión al tantas veces ignorado segundo planeta más próximo al Sol

Sin embargo, es un hecho que las condiciones actuales de Venus son extremadamente inhóspitas. ¿Qué ocurrió? ¿Representa Venus el estadio final de cualquier planeta habitable, o es simplemente una de las muchas maneras en que pueden evolucionar los planetas de su tamaño? Estas son algunas de las principales incógnitas por las que queremos regresar a Venus.

SUPERFICIE OCULTA

Nuestro conocimiento de Venus está limitado por la inmensa dificultad que entraña realizar observaciones a través de su densa y nociva atmósfera. En lo alto, nubes de ácido sulfúrico envuelven el planeta. En la superficie, la presión atmosférica es equiparable a la que ejerce el agua a 900 metros de profundidad en los océanos terrestres. La atmósfera venusiana es tan densa que su principal componente, el dióxido de carbono, se comporta como un fluido supercrítico, con propiedades intermedias entre un gas y un líquido.

Los científicos creen que hace tiempo esa atmósfera se asemejaba a la de la Tierra. Pero, a diferencia de nuestro planeta, Venus carece hoy de un campo magnético que repela el viento solar. Pensamos que, a lo largo de los eones, el viento solar eliminó el agua del planeta, disociándola en iones de hidrógeno y oxígeno y expulsándolos al espacio. En ausencia de agua superficial para disolverlos, el dióxido de carbono y otros gases que emanaban constantemente desde el interior se acumularon en la atmósfera y generaron un efecto invernadero que, hoy, provoca que las temperaturas superficiales de Venus sean unos 450 grados Celsius más altas que en la Tierra: hace tanto calor que las rocas resplandecen.

Nuestros únicos datos de la superficie de Venus proceden de los cuatro módulos de aterrizaje soviéticos *Venera*, que tocaron tierra en las décadas de los setenta y ochenta. Las sondas apenas sobrevivieron unos minutos en la terrible superficie del planeta, pero en ese breve tiempo pudieron realizar medidas aproximadas de su composición química y transmitir los resultados. Más allá de estos datos, todo lo que sabemos sobre la mineralogía superficial de Venus se basa en controvertidas interpretaciones de las observaciones de radar de la sonda *Magallanes*, así como en nuestro limitado conocimiento de las reacciones químicas que podrían producirse entre las rocas del planeta y los gases atmosféricos en las condiciones venusianas.

Hace poco, sin embargo, los investigadores descubrieron que es posible estudiar los minerales de Venus desde una órbita, realizando observaciones en distintas «ventanas» del espectro electromagnético para las que el dióxido de carbono atmosférico no absorbe la luz visible. Providencialmente, esas ventanas coinciden con frecuencias clave para identificar el olivino y el piroxeno, típicos minerales planetarios. Eso nos hace albergar esperanzas de que quizá podamos determinar por fin los ingredientes básicos de Venus. La nave espacial europea *Venus Express*, que orbitó alrededor de Venus desde 2006 hasta 2014, usó una de esas ventanas para elaborar el primer mapa del calor irradiado por la superficie del planeta en gran parte del hemisferio sur. El mapa incluye características espectrales —picos y valles de luz y calor— que permiten identificar los minerales superficiales.

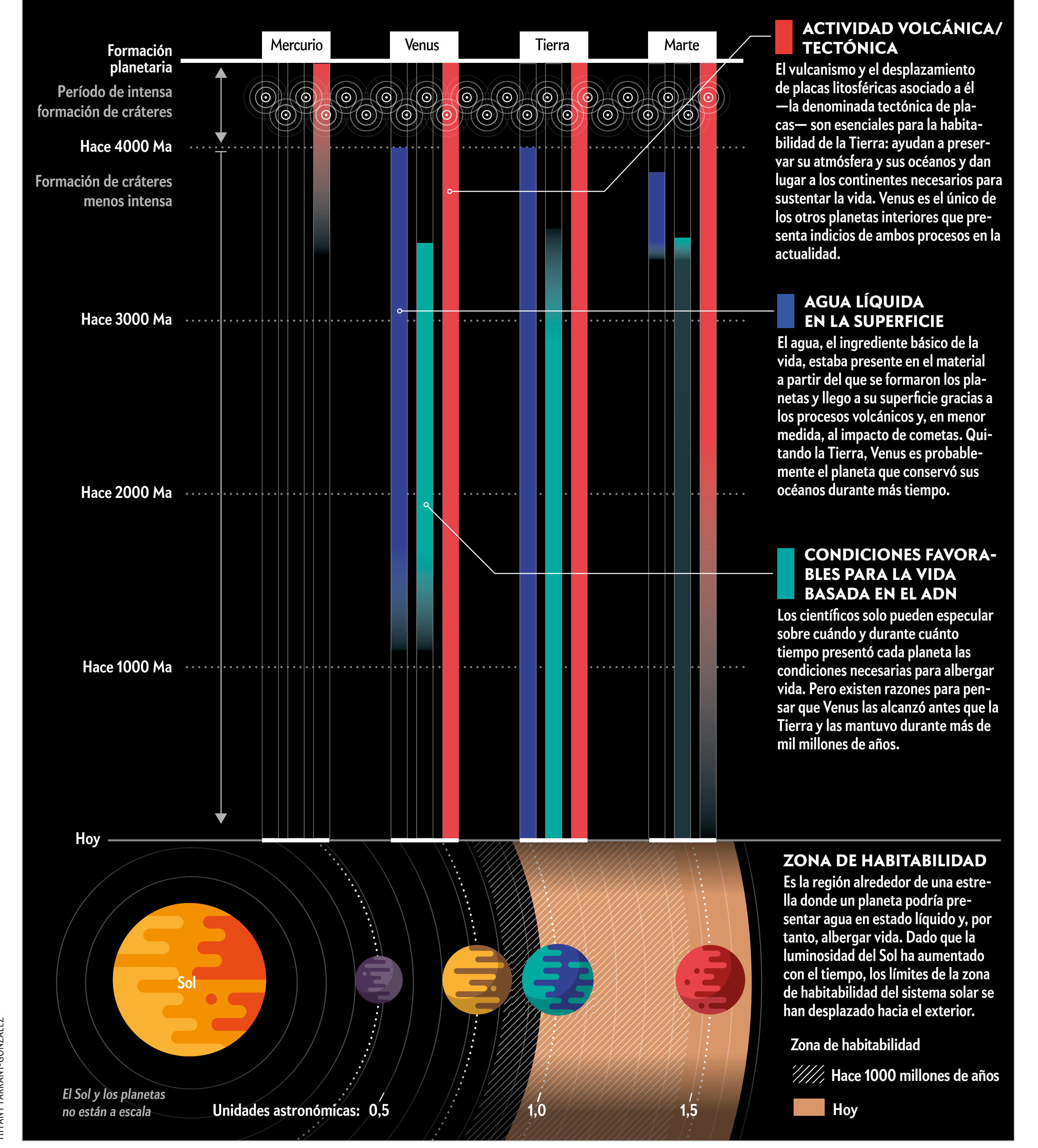
En ese mapa se aprecian también numerosos puntos calientes: áreas que emiten tanto calor que probablemente reflejan un vulcanismo reciente. Se trata de un hallazgo fascinante, puesto que indica que —a diferencia de la Luna, que lleva mucho tiempo inactiva, y de Marte, donde los episodios volcánicos recientes han sido, a lo sumo, de carácter aislado— Venus aún podría presentar actividad, lo cual influiría notablemente en el potencial del planeta para alojar vida.

TECTÓNICA DE PLACAS

En la Tierra, el vulcanismo suele estar relacionado con la tectónica de placas, el desplazamiento y deslizamiento de grandes fragmentos de corteza que explica la mayoría de las estructuras geológicas de nuestro planeta. La tectónica de placas es también responsable de los largos ciclos climáticos de unos 100 millones de años que permitieron la aparición de la vida en la Tierra. La tectónica de placas generó nueva corteza en las dorsales mesoceánicas e indujo el hundimiento de capas de la corteza en el manto, dos procesos que permitieron a nuestro planeta perder calor interno y enfriarse lo suficiente para que surgiera la vida. También causó la emisión a la atmósfera de sustancias volátiles (como agua, CO_2 y dióxido de azufre) procedentes de las

Condiciones para la vida

¿Qué hace que un planeta sea habitable? Este es uno de los mayores interrogantes en astronomía. Al principio la Tierra y Venus eran muy similares, pero ahora uno es un bastión para la vida y el otro, un desierto inhóspito. Estudiando el desarrollo del vulcanismo, la tectónica de placas y otros procesos en Venus, los científicos esperan comprender por qué este planeta evolucionó como lo hizo y si puede enseñarnos algo sobre las posibilidades de hallar vida en los numerosos exoplanetas similares a Venus que hay en la Vía Láctea.



profundidades, así como la reintroducción de esos compuestos en el manto al deslizarse unas placas bajo otras.

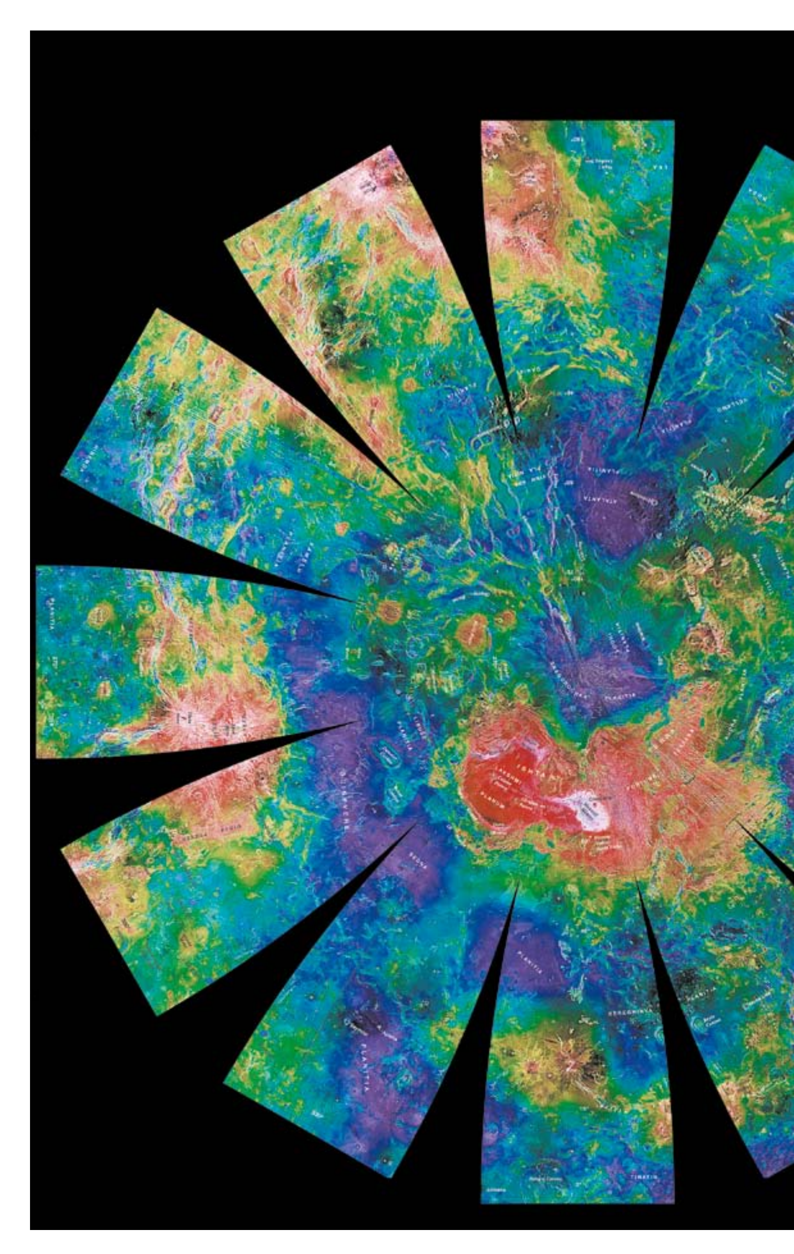
Sin vulcanismo apenas existiría agua superficial y no podría haber surgido la vida. El ciclo de las sustancias volátiles ayuda a preservar la atmósfera terrestre, lo cual fue esencial para la emergencia de la vida. Del mismo modo, los continentes, que proporcionan plataformas flotantes estables por encima del nivel del mar para que la vida marina evolucione en tierra firme, también son producto de la tectónica de placas. Por estos y otros muchos motivos, es fundamental dilucidar si en Venus existe actividad tectónica y comprender las razones de su presencia o su ausencia.

En la Tierra, los escasos datos disponibles indican que la tectónica de placas comenzó hace ya 4000 millones de años, en un proceso que no dejó demasiadas huellas. Desconocemos cómo se pasa de un mundo cubierto de basalto, posiblemente con océanos, a un intrincado sistema de placas en movimiento y con características complejas. Según una de las principales hipótesis, «plumas» o columnas de material procedente del interior de la Tierra prorrumpen a la superficie y ponen en marcha la subducción, es decir, el deslizamiento de una placa bajo otra. La pluma caliente debilita la litosfera (que comprende la corteza y parte del manto superior) y su empuje fractura la superficie. La presión ejercida por la cabeza de la pluma puede dar lugar a un vulcanismo violento, como el observado en la Tierra y Venus, y el peso del material sobre la litosfera fracturada puede hacer que esta se hunda e inducir la subducción. Si este proceso se repite con suficiente frecuencia, los fragmentos en subducción se conectan y comienza la tectónica de placas.

Eso es lo que podría estar ocurriendo en Venus, que actualmente presenta una litosfera caliente y delgada, como la de la Tierra cuando se activó la tectónica de placas. Algunos datos muestran claras similitudes entre ciertas estructuras de Venus y zonas de subducción de la Tierra: un ejemplo es la corona Artemisa, una formación circular próxima al ecuador de Venus que es similar en escala y morfología a la fosa de las Aleutianas (la cual discurre bajo el mar, paralela a la costa de Alaska). Los científicos piensan que esas estructuras venusianas se corresponden con puntos donde una pluma asciende desde el manto a la superficie y fractura la corteza.

Asimismo, recientes experimentos de laboratorio y simulaciones por ordenador indican que las plumas inducen el proceso de subducción en los lugares donde fracturan la capa superior de la corteza. En particular, los experimentos explican por qué la subducción solo parece desarrollarse en parte del borde de la estructura circular: al agrietarse en la zona central, la frágil litosfera se divide en fragmentos, del mismo modo que un papel se rasga en varios pedazos al agujerearlo con un lápiz. A medida que la litosfera se hunde, sigue rompiéndose y formando fragmentos; si estos se unieran, nos hallaríamos ante el inicio de la tectónica de placas en Venus.

Las imágenes de esas estructuras no tienen suficiente resolución como para estar seguros de qué muestran, pero parece que la tectónica de placas en Venus se encuentra en las fases iniciales de su desarrollo. En las observaciones de *Magallanes* no se aprecian signos de placas interconectadas, sino más bien puntos aislados donde la subducción está empezando a producirse, siempre alrededor de esas regiones circulares donde parecen ascender las plumas. Esto suscita dos preguntas. ¿Por qué no se desarrolló antes la tectónica de placas? ¿Cómo evolucionará a partir de ahora? A medida que Venus se enfríe más, las fallas que se están formando podrían consolidarse, permitiendo que el



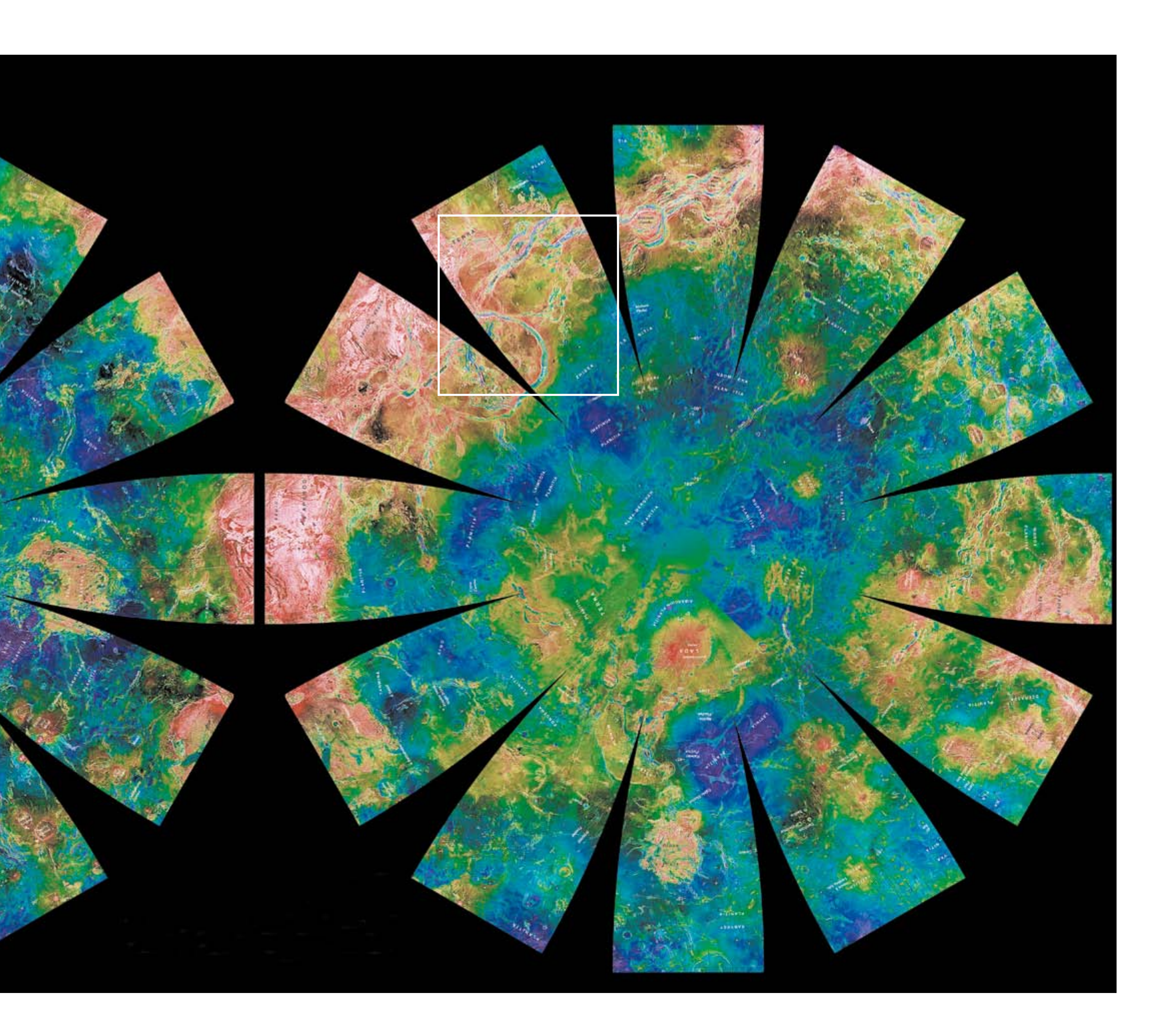
LOS MAPAS GLOBALES DE VENUS elaborados a partir de los datos de las sondas *Magallanes* y *Venera* muestran diversas estructuras, como la corona circular Artemisa (*recuadro*), que podrían ser indicios de una tectónica de placas.

NASA, JPL Y USGS

planeta realice la misma transición hacia la tectónica de placas que en su día experimentó la Tierra. Si lo que vemos en Venus es el comienzo de la actividad tectónica, ese mismo proceso y la consiguiente estabilización atmosférica podrían ser comunes en los exoplanetas que se encuentran en vías de alcanzar la habitabilidad.

UNA VISIÓN MÁS COMPLETA

Hay más razones que nunca para enviar una nueva gran misión al tantas veces ignorado segundo planeta más próximo al Sol. Con espectros e imágenes globales de alta resolución, podríamos responder a importantes preguntas sobre el vulcanismo y la posible tectónica de placas de Venus. ¿Realmente está ocurriendo ese proceso en estos momentos? ¿Qué relación existe entre la



actividad superficial del planeta y su dinámica interna? ¿Cómo afectan las condiciones de Venus, como sus temperaturas, a esta actividad tectónica? ¿Son algunas de las estructuras superficiales que observamos, como los paisajes surcados de arrugas denominados «enlosados», o *tesserae*, vestigios de una época pasada y húmeda?

En 2019, la NASA abrirá una convocatoria para la siguiente tanda de misiones Discovery, las que emplean sondas espaciales de menor tamaño. Dos de las autoras de este artículo (Dyar y Smrekar) lideramos una propuesta llamada VERITAS (Emisividad, Radiociencia, Interferometría SAR, Topografía y Espectroscopia de Venus) que cartografiaría la superficie de Venus con un nivel de detalle sin precedentes. Transportaría diversos instrumentos, entre ellos una cámara y un espectrómetro para mejorar en varios órdenes de magnitud la resolución topográfica y elaborar el primer mapa global de la composición superficial del planeta. También se están desarrollando otras propuestas de misiones a Venus, y deberíamos conocer los resultados finales en 2021.

Casi 30 años después de que la sonda *Magallanes* llegase a Venus, la generación de científicos que la lanzaron se está jubilando. Una nueva misión permitiría pasar el testigo a una nueva generación que pueda ayudarnos a comprender por qué nuestro planeta hermano evolucionó de manera tan distinta a la Tierra. Quizá incluso averigüemos qué condiciones deben darse para que surja la vida.

PARA SABER MÁS

Was Venus the first habitable world of our solar system? M. J. Way et al. en *Geophysical Research Letters*, vol. 43, n.º 16, págs. 8376-8383, agosto de 2016.

Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus. A. Davaille en *Nature Geoscience*, vol. 10, págs. 349-355, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cambio climático global en Venus. Mark A. Bullock y David H. Grinspoon en *IyC*, mayo de 1999.

Pérdidas en las atmósferas planetarias. David C. Catling y Kevin J. Zahnle, en *IyC*, julio de 2009.



POLÍTICA

LA POLÍTICA CIENTÍFICA ESPAÑOLA, EN EL ATOLLADERO

Perdido en su laberinto burocrático, el sistema español de ciencia y tecnología sigue lastrado por múltiples carencias e ineficiencias. La reforma es urgente

Aurelia Modrego Rico

EN SÍNTESIS

La ciencia en España sufre desde hace largo tiempo las consecuencias de un desinterés político que se ha traducido en profundas deficiencias estructurales y presupuestarias.

La aplicación de la Ley de la Ciencia de 1986 logró que nuestro sistema de I+D+i avanzara posiciones en el panorama internacional y alcanzara cierto nivel de excelencia.

Pero en 2008, los drásticos recortes que llegaron en nombre de la crisis financiera volvieron a colocar la ciencia española a la cola de Europa y la dejaron en una situación crítica.

Para salir de este atolladero urge aumentar la inversión y reformar los sistemas de gestión, evaluación e información, hasta ahora claramente ineficientes.

Aurelia Modrego Rico, miembro honorífico del Instituto de Economía de la Universidad Carlos III de Madrid, fue directora adjunta de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva y subdirectora general de Promoción General del Conocimiento. Es coordinadora de los proyectos DECIDES 2017 y 2018 (Debates sobre Ciencia y Desarrollo Económico y Social), que ha elaborado la Confederación de Sociedades Científicas Españolas para analizar las políticas científicas del Gobierno.



«El enemigo fue siempre el mismo: la Administración y la burocracia. Los mejores planes, las intenciones mejores, los propósitos más ideales quedan destrozados contra el muro inconmovible de la rutina.»

Enrique Moles Ormella
Discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
28 de marzo de 1934

Así describía Moles, uno de los principales introductores de la química moderna en España, la lamentable situación que vivía la ciencia en nuestro país a principios del siglo xx. 85 años después, el «enemigo» sigue siendo prácticamente el mismo: un sistema de gestión ineficiente, fruto de un claro desinterés político por la ciencia. Parece que los gobernantes españoles siguen sin apreciar el valor del conocimiento.

Sin embargo, el avance de la investigación científica y técnica es el motor de las grandes transformaciones tecnológicas, económicas y sociales que la humanidad ha experimentado a lo largo de los últimos decenios. La estrategia de cualquier país que tenga como objetivo disponer de un mercado de trabajo digno, con políticas sociales que reduzcan las desigualdades y den cobertura a los más desfavorecidos, debe incorporar la generación, difusión y utilización del conocimiento como factores clave para poder solucionar los problemas más inmediatos y hacer frente a las situaciones futuras. En caso de no hacerlo, los gobernantes serán los responsables de que la cada vez mayor dependencia de los ciudadanos, como usuarios ciegos de las nuevas ideas, bienes y servicios generados por los grupos de poder, acabe convirtiéndose en una nueva forma de sometimiento.

Resaltar las ideas anteriores resulta especialmente pertinente en el caso de España, donde, por diversas circunstancias, todavía hoy sigue sin apreciarse en su justo valor la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación (I+D+i) como mecanismos de progreso, bienestar y libertad. Salvo en momentos muy excepcionales, y hasta muy entrado el siglo xx, ni los poderes públicos ni el sector privado demostraron un especial interés por apoyar e impulsar la investigación científica y la educación, más allá de las tópicas declaraciones de principios.

Es a partir de los años ochenta cuando en distintos estamentos de la sociedad española se empieza a considerar que el futuro del país, su avance socioeconómico, cultural y democrático está íntimamente ligado a la generación de nuevas ideas y de conocimiento. Es entonces cuando el Gobierno emprende acciones para fomentar y apoyar la investigación científica y tecnológica.

En este sentido, destacan los motivos que exponía la Ley de la Ciencia de 1986: «La investigación científica y el desarrollo tecnológico se han desenvuelto tradicionalmente en España en un clima de atonía y falta de estímulos sociales, de ausencia de instrumentos que garantizasen la eficaz intervención de los poderes públicos [...] Si conocidos son los males que esta situación ha acarreado para las posibilidades de progreso técnico, modernización y racionalización de los hábitos y actitudes de la sociedad española, en el pasado, los riesgos que en el inmediato futuro derivarán de la persistencia de un estado de cosas semejante apenas precisan ponderación».

A pesar de que la citada ley impulsó el avance científico y la modernización del modelo de desarrollo económico y social, pasados más de treinta años la ciencia en España sigue pidiendo a gritos un profundo replanteamiento, tanto en el plano conceptual como en el procedimental. Dedicaremos este artículo a analizar la situación actual de nuestro sistema de ciencia y a proponer algunas líneas de mejora. Pero antes, recordemos cuáles son las razones básicas de la intervención pública en materia de I+D+i y las particularidades de su planificación.

EL RETO DE GESTIONAR LA INCERTIDUMBRE Y LA APROPIABILIDAD

La política científica y tecnológica es necesaria para conseguir una sociedad más informada, más libre y con mayor impulso innovador. Una sociedad, por tanto, con una mayor capacidad de resolver los problemas que puedan surgir en cualquier ámbito, sea el económico, educativo, laboral, social, cultural, etcétera. Para ello hace falta que el sector público promueva e impulse la investigación científica y tecnológica en universidades, centros de investigación, hospitales y empresas; asimismo, debe estimular la curiosidad en los jóvenes y en los ciudadanos en general, para que entiendan y comprendan cómo funciona el mundo y estén preparados para resolver los retos y desafíos a los que han de enfrentarse.

Al igual que en cualquier otra intervención pública, el alcance y el marco de actuación de la política científica deben estar bien definidos y basados en pruebas sólidas y argumentos rigurosos. Solo así será posible detallar con precisión los objetivos y la forma de conseguirlos, utilizando los recursos de la mejor manera posible. Eficacia y eficiencia deben ser las características clave de toda actuación pública.

En el caso de la I+D+i, el apoyo público ha de planificarse teniendo en cuenta la naturaleza del conocimiento científico y las particularidades del desarrollo de la actividad investigadora. Entre estas destacamos las siguientes: la incertidumbre asociada a los resultados de la investigación, el problema de la «apropiabilidad» del conocimiento generado y la necesidad de que ese conocimiento acabe beneficiando a todos los ciudadanos. Analicémoslas una por una.

Los resultados de un proyecto de investigación no pueden predecirse. De hecho, investigar consiste en indagar para descubrir algo que todavía se desconoce. La ciencia entraña, por tanto, incertidumbre. Y esta incertidumbre aumenta cuando la solución a los problemas abordados requiere la colaboración de distintas disciplinas y técnicas. Pensemos en el ámbito de la salud, donde cualquier avance puede requerir la convergencia de conocimientos de áreas tan diversas como la biología, la química, la física, las tecnologías de la imagen, el análisis de datos o la economía.

La dificultad de abordar retos científicos complejos y la falta de previsión de los resultados puede disuadir a la iniciativa privada de acometer proyectos de I+D+i. Es evidente que estos efectos disuasorios no afectan a todos los agentes por igual. Las pequeñas y medianas empresas están en peores condiciones que las grandes corporaciones para afrontar riesgos y, además, tienen menos posibilidades de «comprar» conocimiento. En situaciones de desigualdad como esta es cuando se precisa una actuación pública que promueva, impulse y financie este tipo de proyectos que de otra forma no se llevarían a cabo, con el retroceso económico y social que ello conllevaría.

La segunda particularidad a la que nos referíamos atañe a la apropiabilidad del conocimiento. Si el conocimiento generado por la investigación científica no puede ser apropiado (mediante patentes, marcas, etcétera) por los agentes que lo producen, los incentivos para investigar disminuyen, sobre todo en el entorno privado. En el caso de que el conocimiento sea fácilmente transferible, las empresas no tienen alicientes para financiar proyectos de investigación, puesto que los resultados van a ser compartidos con otros agentes que no han asumido ningún riesgo. Si este tipo de investigación se considera de interés, es preciso que exista una actuación pública que la impulse.

En el caso de que la investigación se desarrolle con financiación pública, el debate está servido. Por una parte, no existe acuerdo en la comunidad científica sobre cuál sería la mejor forma de que la ciencia fuera «abierta» (*open science*), en el sentido de que los resultados de la investigación fueran accesibles para todos los ciudadanos. Por otra parte, la publicación de los artículos científicos está condicionada en gran medida por intereses editoriales que tienen un papel relevante en la transmisión del conocimiento.

A finales del pasado mes de noviembre, la Unión Europea lanzó una propuesta, el Plan S, para que la investigación sufragada con dinero público se publique únicamente en revistas de acceso abierto a partir de 2020. Este plan, que parece tan lógico y recoge el espíritu de la «ciencia abierta», tendrá sin duda un gran impacto en el comportamiento de los investigadores, las instituciones y las revistas científicas. Se basa en la idea de que el objeto primordial de evaluación sean las aportaciones científicas del investigador, no de las revistas en las que publica. Ello supone que el famoso índice de impacto, el indicador de referencia en la evaluación científica actual, debería perder protagonismo y dejar paso a otros criterios de evaluación y de definición de los derechos de autor [*véase* «La tiranía del factor de impacto», por Reinhard Werner; Investigación y Ciencia, marzo de 2015].

El tercer elemento que debe orientar la política científica es la necesidad de crear un entorno que favorezca la generación de conocimiento y nuevas ideas, y facilite su utilización en provecho de todos los ciudadanos. La misión esencial de los poderes públicos consiste en apoyar e impulsar la actividad científica de forma que sea la sociedad en su conjunto la beneficiaria de los resultados de la investigación.

¿GASTO O INVERSIÓN?

El diseño de la política científica no puede ser, pues, objeto de improvisación, ni convertirse en un mero procedimiento administrativo. Por el contrario, requiere definir con precisión y claridad los objetivos, el ámbito de intervención, el marco de actuación institucional y el presupuestario. Asimismo, son imprescindibles un sistema de información que garantice la gestión eficiente de los recursos y un sistema de evaluación que permita valorar los resultados obtenidos, así como los beneficios económicos y sociales derivados de las actividades de I+D+i.

En relación con la valoración de los resultados, es necesario destacar el peligro de aplicar un enfoque cortoplacista. Con excesiva frecuencia, el impacto económico y social de la investigación científica se mide solo en términos de resultados inmediatos, a partir de indicadores como el número de publicaciones, el impacto de las revistas o las patentes registradas. Esta visión cortoplacista es el peor enemigo de la política científica, puesto que se fija solo en los árboles y no ve el bosque tupido de las nuevas ideas y conocimiento que día a día se genera, se difunde y coloniza el mundo.

La visión cortoplacista es el peor enemigo de la política científica

Los resultados de la investigación científica tienen un alcance mayor que el que puede deducirse a partir de los indicadores habituales. Por un lado, porque muchos de los grandes hallazgos pueden no ser reconocidos en un primer momento [*véase* «Las bellas durmientes de la ciencia», Amber Williams; Investigación y Ciencia, marzo de 2016]. Por otro, porque a lo largo del tiempo se produce un efecto cascada y de economía de escala en la difusión del conocimiento debido a la interacción entre diferentes individuos, agentes y disciplinas, y en entornos distintos del estrictamente científico. Por ejemplo, el impacto económico y social de la biotecnología (7 por ciento del PIB de España) y de las tecnologías de la comunicación (en torno al 5 por ciento del PIB) son el resultado de más de treinta años de apoyo a la investigación en estas áreas. La evaluación de los resultados de I+D+i ha de tener, por tanto, un horizonte temporal y un alcance más amplio que el que aportan los indicadores al uso.

Además, si la ciencia se concibe como una inversión —no como un gasto—, debe asumirse que su impacto en los distintos ámbitos (económico, social y cultural) será incierto y, en muchos casos, perceptible solo a medio y largo plazo. Esta perspectiva requiere una estrategia política sólida, alejada de cualquier electoralismo.

Repasemos ahora cuáles han sido los principales hitos del desarrollo de la política científica en España a lo largo de los últimos tres decenios.

DE LA LEY DE LA CIENCIA DE 1986 A LA CRISIS DE 2008

Comenzamos este recorrido tomando como punto de referencia la Ley de la Ciencia de 1986, que marcó un antes y un después en la política científica española. Como figura en el texto legal,

de apenas 16 páginas —algo insólito en la legislación española—, «La necesidad de corregir los apuntados males tradicionales de nuestra producción científica y técnica, básicamente centrados en la insuficiente dotación de recursos y desordenada coordinación y gestión de los programas investigadores, así como la de asegurar que España participe plenamente en el proceso en que están inmersos los países industrializados de nuestro entorno, justifican ampliamente la promulgación de una normativa que [...] establezca los necesarios instrumentos para definir las líneas prioritarias de actuación en materia de investigación científica y desarrollo tecnológico, programar los recursos y coordinar las actuaciones entre los sectores productivos, centros de investigación y Universidades».

Según Luís Antonio Oro Giral, una de las personalidades más relevantes de la química en España y figura destacada en el desarrollo de la política científica de este país, la Ley de la Ciencia de 1986 adecentó el panorama científico español. En sus propias palabras: «Esta ley, que coincide en el tiempo con la entrada de España en la Unión Europea, vino a poner orden en el llamado modelo "espontáneo" de organización del sistema nacional de investigación y desarrollo, que era el adjetivo entonces utilizado para no tener que reconocer la carencia de cualquier modelo explícito; puso en marcha mecanismos de programación de la actividad científica y tecnológica; creó una cierta coordinación entre los ministerios con responsabilidades en Investigación científica y Desarrollo tecnológico (I+D) y creó el Plan Nacional de I+D, que se convirtió en el principal instrumento de fomento de la actividad investigadora en el sector público».

Un elemento clave de la Ley de la Ciencia fue la creación de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva (ANEP), que desempeñó un papel fundamental en los cambios que se produjeron en el comportamiento y asunción de responsabilidades de los investigadores. Esta agencia constituyó el elemento catalizador de la contribución y colaboración de la comunidad científica y de otros agentes públicos y privados que entendieron y participaron del proyecto de colocar a España en el ámbito científico internacional.

Con la Ley de la Ciencia, escueta pero con objetivos claros, se lograron varios retos: introducir la investigación científica en la agenda política; poner en marcha estructuras eficientes de evaluación y de gestión a nivel europeo; internacionalizar la actividad científica española; crear infraestructuras científicas y mejorar las existentes; tender puentes con el sector productivo y generar un cierto clima de confianza en los poderes económicos.

Esa etapa de la política científica española vino marcada por el compromiso y por una visión global e integradora de los agentes involucrados en el proceso de I+D+i. La Ley había nacido con la voluntad de impulsar la actividad científica y el desarrollo tecnológico a todos los niveles, mediante la dotación de los recursos y los instrumentos necesarios para asegurar la máxima eficiencia y eficacia. Una prueba de ello es el aumento del esfuerzo financiero: el gasto ejecutado en I+D sobre el producto interior bruto (PIB) pasó del 0,45 por ciento en 1983 al 0,61 por ciento en 1986 y al 0,85 por ciento en 1990. En este último año, el esfuerzo de la Unión Europea ya representaba el 1,92 por ciento.

A ello no fue ajeno el peso político del entonces Ministerio de Educación y Ciencia, que, además de aumentar las partidas presupuestarias, asumió el compromiso de que las estructuras y mecanismos de gestión y evaluación, lejos de ser meros procedimientos burocráticos, potenciaran la investigación científica y tecnológica en todos los ámbitos y sectores.

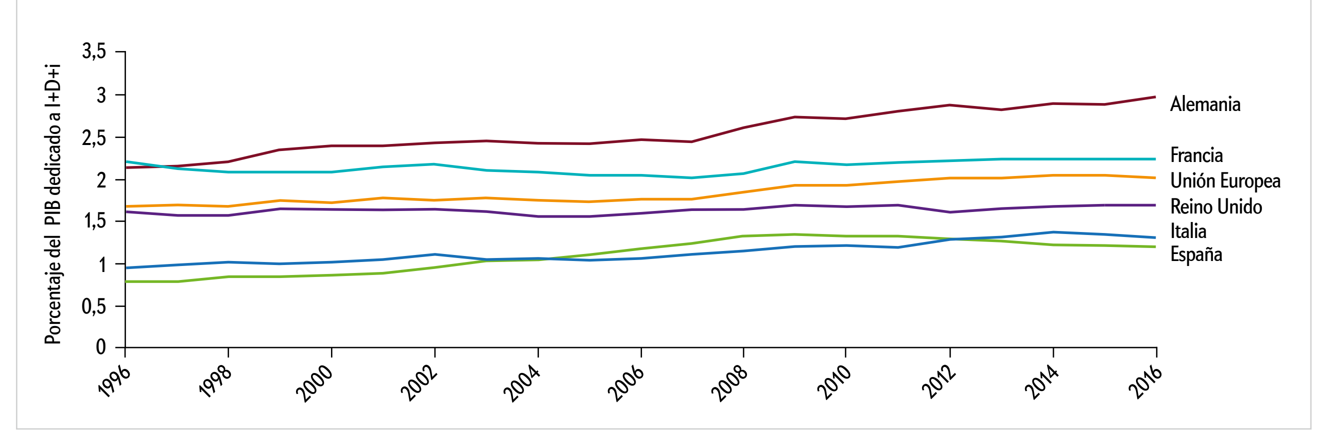
El aumento del esfuerzo en I+D y las mejoras de organización y gestión introducidas en el sistema de ciencia y tecnología hicieron que España fuera reduciendo la brecha que la separaba de los países de la Unión Europea, en particular de Francia y el Reino Unido, no tanto de Alemania, y adelantara a Italia, y que la ciencia española comenzara a destacar en el contexto internacional.

Esa tendencia cambió drásticamente a partir del año 2009. Bajo el paraguas de la crisis, se produjeron grandes recortes en la inversión en ciencia que hicieron que España volviera a alejarse de Europa. Las consecuencias no tardaron en llegar. El

POLÍTICA PRESUPUESTARIA

De nuevo en la cola de Europa

La Ley de la Ciencia de 1986 supuso un claro impulso a la ciencia en España. Las mejoras organizativas vinieron acompañadas de un aumento en la inversión, que poco a poco se fue acercando a la media europea. Sin embargo, esa tendencia se vio truncada en 2009, cuando, en nombre de la crisis económica, llegaron los recortes. Ese cambio de rumbo político volvió a alejar la ciencia española de Europa y dinamitó buena parte de lo que se había construido durante los últimos decenios.



FUENTE: BANCO MUNDIAL, OCDE.

número de investigadores pasó de 134.653 en 2010 a 126.633 en 2016 (una disminución del 6 por ciento). Las publicaciones españolas, que en 2006 suponían el 2,89 por ciento del total mundial, aumentaron hasta representar el 3,24 por ciento en 2013, para luego estancarse. Las secuelas económicas y empresariales también fueron notables. Según datos del Instituto Nacional de Estadística, el porcentaje de empresas innovadoras sobre el total de empresas españolas pasó del 20,8 por ciento en 2008 al 12,5 por ciento en 2016.

El cambio de rumbo de la política científica española provocada por la crisis no tiene referentes en la mayoría de los países europeos. Los recortes demuestran la escasa valoración de la ciencia, por parte de la clase política y de otros estamentos, como un factor determinante para reforzar y modernizar la estructura económica, social y productiva. A ello se añade la falta de voluntad para abordar las reformas de gestión reclamadas desde hace largo tiempo por la comunidad científica, que en repetidas ocasiones ha denunciado a las autoridades políticas los problemas del sector.

Ya en junio de 2005, la Confederación de Sociedades Científicas de España (COSCE) presentó las conclusiones de la Acción CRECE (Comisiones de Reflexión y Estudio de la Ciencia en España), en las que se recogían un conjunto de propuestas para revitalizar y reformar nuestro sistema científico. (Las propuestas más recientes de la COSCE pueden consultarse en el Informe DECIDES 2018, la última edición de los análisis que esta organización elabora con el propósito de realizar un seguimiento de las políticas científicas anunciadas y ejecutadas por el Gobierno). En abril de 2018, la Federación de Jóvenes Investigadores, la Red de Asociaciones de Investigadores Científicos Españoles en el Exterior, los dos sindicatos mayoritarios y otras organizaciones entregaron en el Congreso de los Diputados una petición firmada por más de 277.000 personas en la que se pedía al Gobierno que detuviera «la situación de progresivo abandono de la ciencia española» causada por los recortes. A finales del 2018, la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales aprobó la «Declaración sobre la financiación y gestión de la investigación científica en España». El documento presentaba propuestas para mejorar la eficacia de la inversión en I+D y sugería como ejemplo el modelo finlandés. Si el Gobierno sigue haciendo oídos sordos, este país podría acabar en una situación de dependencia económica y social con escasas posibilidades de retorno.

Veamos a continuación algunas de las principales debilidades del sistema español de ciencia y tecnología, las que requieren una solución más urgente. Nos centraremos en estas cuatro: unos presupuestos insuficientes e inestables, una gestión ineficaz, una evaluación de los resultados excesivamente burocratizada y un ausente sistema de información.

LOS PRESUPUESTOS: RECORTES E INGENIERÍA FINANCIERA

Contar con los recursos precisos es una condición necesaria para impulsar la actividad científica, pero no suficiente. Además de tenerlos, hay que gestionarlos bien. Los Presupuestos Generales del Estado constituyen el principal indicador de la política científica del Gobierno. Si queremos saber cuán importante es la ciencia para los poderes públicos, basta analizar las partidas presupuestarias destinadas a I+D+i.

Una simple mirada a la evolución de esas partidas entre 1990 y 2018 [*véase el recuadro* «Claves para interpretar los presupuestos»] muestra una leve tendencia creciente entre 1990 y 2005. Le sigue un destacado aumento hasta 2009, año a partir del cual se producen recortes tan importantes que, a pesar de la recuperación iniciada en 2014, la partida de 2018 todavía no logra alcanzar el nivel de 2007.

Un análisis más detallado de la gráfica revela dos aspectos. Por un lado, que la financiación pública de la ciencia muestra un comportamiento procíclico, es decir, que se desarrolla en el mismo sentido que los ciclos económicos (en épocas de bonanza, se refuerza; cuando hay crisis, se recorta). Por otro, que el Estado viene practicando una equívoca «ingeniería financiera» desde 1998.

Analicemos el carácter procíclico de la financiación. La fuerte e inmediata rebaja de la partida presupuestaria ante la crisis de 2008 demuestra que la I+D+i no se considera una inversión, sino un gasto prescindible y, como tal, en tiempos de recesión se recorta radicalmente su financiación. Cuando se inicia la recuperación económica, vuelven a asignarse más recursos a la ciencia, pero no con la misma rapidez ni contundencia con la que se aplicaron previamente los recortes. Fijémonos en los siguientes datos. En el período entre 2009 y 2013 se pasó de una dotación de 9673 a 5932 millones de euros (una reducción del 38,7 por ciento), valor inferior al de 2006. En 2014 se inició un aumento en las partidas presupuestarias, pero muy lentamente: los 7062 millones de euros de 2018 seguían siendo muy inferiores a los 8124 de 2007, y estaban lejos de alcanzar los 9673 de 2009.

La reducción sistemática de la financiación pública de la ciencia en los años de crisis se ha convertido en la marca española de la política científica. Este comportamiento es totalmente opuesto al de otros países europeos como Alemania, que, con modelos económicos más sólidos, apuestan por políticas contracíclicas (que intentan contrarrestar el ciclo económico). Bajo esta estrategia subyace una visión de la investigación científica y el desarrollo tecnológico como inversiones a medio y largo plazo (por lo que requieren estabilidad presupuestaria), además de ser factores imprescindibles para salir de la propia crisis.

Para desentrañar la ingeniería financiera que los sucesivos Gobiernos vienen aplicando desde 1998, resulta clave comprender la función de dos tipos de partidas: los «fondos no financieros» y los «fondos financieros». Los fondos no financieros son subvenciones destinadas a la investigación realizada en organismos públicos y privados. Los fondos financieros (la diferencia entre el total presupuestado y los fondos no financieros) corresponden a préstamos reembolsables orientados fundamentalmente a las empresas.

A priori, la existencia de esos fondos financieros (o préstamos) no debiera ser objeto de cuestionamiento, ya que pueden considerarse un mecanismo para incentivar y promover en las empresas ciertas actividades de I+D+i, que, posiblemente, no se realizarían si estas tuvieran que financiarlas con sus propios recursos. El problema radica en que, desde hace años, y en un porcentaje muy elevado, estos fondos no se acaban ejecutando. Esta situación plantea dos cuestiones. En primer lugar, ¿cuáles son las razones por las que las empresas no hacen uso de esa financiación, que acaba en las arcas públicas sin alcanzar sus objetivos? En segundo lugar, ¿por qué se insiste una y otra vez en incluir esas partidas presupuestarias que encubren la realidad de la inversión ejecutada?

Veamos cómo ha evolucionado la distribución de los presupuestos a lo largo de los últimos años. Hasta 1996, el porcentaje de fondos financieros sobre el total del presupuesto en I+D+i no supera el 5,5 por ciento. En 1997 aumenta hasta el 19,5 por ciento y a partir de entonces sigue una trayectoria creciente

hasta alcanzar un máximo del 62,4 por ciento en el año 2015, manteniéndose desde entonces en torno al 60 por ciento. Es evidente que el aumento del peso de los fondos financieros se debe a un importante crecimiento relativo de la partida asignada a dichos fondos entre 1998 y 2010, año en el que alcanza su valor máximo, 5702 millones de euros, superando con mucho los 3572 millones asignados a subvenciones. De esta manera, mientras que los fondos financieros se multiplican por 8,5, las subvenciones apenas lo hacen por 3,4.

En cuanto a la ejecución de los presupuestos, los análisis de la COSCE ponen de manifiesto que en el año 2000 el porcentaje de ejecución de los créditos totales disponibles superó el 90 por ciento, disminuyó levemente hasta el 80 por ciento en el 2008 y, a partir de ahí, se contrajo de forma abrupta hasta llegar al 29,7 por ciento en 2017. Ello significa que de los fondos disponibles en 2017 (4635 millones de euros) no se utilizaron 3259 (un 70 por ciento); de ellos, 3185 millones (un 98 por ciento) correspondían a recursos financieros (préstamos) no ejecutados. En cambio, de las subvenciones solo dejaron de gastarse 74 millones de euros, un 2,8 por ciento del crédito disponible.

Es evidente que la estrategia de juntar subvenciones y préstamos, con evoluciones de partidas tan descompensadas, corresponde a una maniobra de distracción a la hora de presentar los presupuestos. El dinero asignado a los créditos enmascara los recortes aplicados en las subvenciones. Así lo demuestra el desplome del porcentaje de utilización de los fondos financieros.

LA GESTIÓN: INEFICIENCIA SISTÉMICA

El problema de la no utilización de gran parte de la financiación presupuestaria disponible constituye una prueba más, no solo del desinterés político por la I+D+i, sino también de la ineficiencia del sistema español de ciencia y tecnología, que ha ido creciendo y haciéndose cada vez más complejo sin que las estructuras y los instrumentos de gestión y administración se hayan adecuado de forma conveniente. En estas condiciones, no es de extrañar la ausencia de una agenda de convocatorias y la existencia de una burocracia laberíntica y asfixiante.

Ante esta situación, la comunidad científica española ha solicitado de forma reiterada la creación de un organismo de financiación y evaluación de la investigación. Como puede leerse en el Informe DECIDES 2018 de la COSCE, la Agencia Estatal de Investigación «es necesaria y urgente para evitar el estrangulamiento administrativo y de gestión del sistema de financiación pública de la ciencia en España».

A pesar de algunos intentos frustrados de poner en marcha un organismo con características similares a los existentes en el contexto internacional, y de que en la Ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación de 2011 se contemplaba la creación de la Agencia Estatal de Investigación en el plazo de un año, esta no nació hasta junio de 2016, convertida en un ente sin independencia ni autonomía y sin capacidad para resolver ningún tipo de problemas.

En el plano más inmediato de la gestión cabe mencionar la aprobación por el Consejo de Ministros del pasado 8 de febrero de un paquete de medidas urgentes orientadas a eliminar algunas trabas burocráticas implantadas en 2014 (el real decreto agiliza la compra de materiales e instrumentos de investigación hasta importes de 50.000 euros y facilita la contratación y la estabilización del personal). A pesar de que la eficacia de estas medidas podría verse claramente disminuida al carecer del marco político indispensable, su no aplicación podría generar un colapso de la ciencia en España.

LA EVALUACIÓN: MUCHA BUROCRACIA Y POCAS CONCLUSIONES

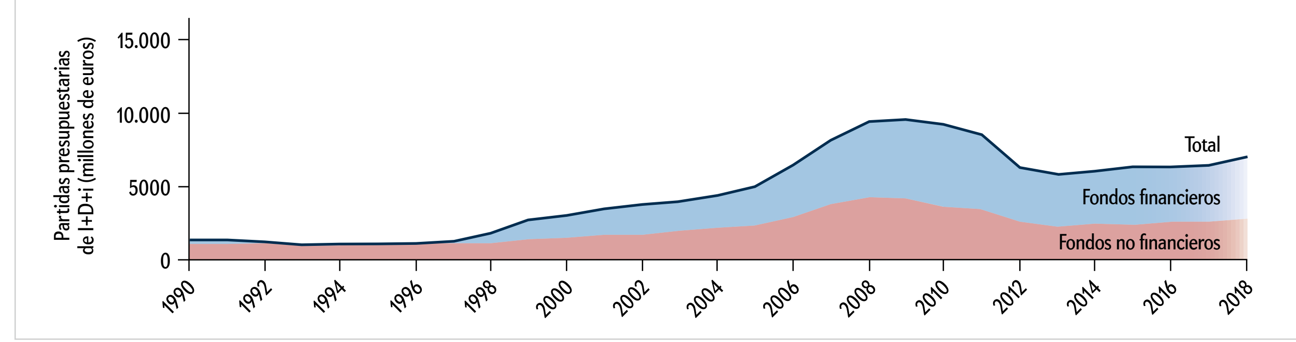
La evaluación de la actividad científica se ha convertido en España en un proceso meramente burocrático que no alcanza a

INGENIERÍA FINANCIERA

Claves para interpretar los presupuestos

El dinero que el Gobierno destina a la ciencia se reparte en dos tipos de partidas: los fondos no financieros y los fondos financieros. Los primeros corresponden a subvenciones para la investigación realizada en organismos públicos y privados. Los segundos, a préstamos reembolsables orientados principalmente a las empresas. Los fondos financieros tienen su razón de ser porque incentivan a las empresas a llevar a cabo proyectos de I+D+i que probablemente no se realizarían si estas tuvieran que autofinanciarse. En teoría, pues, constituyen una buena herramienta. En realidad, sin embargo, la mayor parte de estos préstamos nunca acaban ejecutándose, por lo que se convierten en recursos que se quedan sin gastar en las arcas públicas. Se trata de una inversión aparente, ficticia.

Por tanto, si se quiere saber cuánto se está invirtiendo en ciencia, hay que analizar en detalle la distribución de los presupuestos entre fondos no financieros y fondos financieros, y comprobar el porcentaje de ejecución de cada uno de ellos. Aumentar la inversión en ciencia engrosando la partida de fondos financieros, que en muchos ejercicios no se han gastado en un porcentaje muy alto, ha sido una estrategia de los sucesivos Gobiernos desde 1998 para enmascarar los recortes presupuestarios.



FUENTE: INFORMES DE PRESUPUESTOS GENERALES DE ESTADO, COSCE.

valorar los resultados obtenidos. Saber qué se hace, cómo se hace y dónde se hace es la base de cualquier política pública.

La Ley de la Ciencia de 1986 fue innovadora al crear la ANEP. La agencia nació con el propósito de evaluar «con el máximo rigor e independencia» cuantos asuntos científico-técnicos le fueran encomendados por el Gobierno, además de la realización de estudios de prospectiva. Sin embargo, esa claridad en la definición de los objetivos no se vio acompañada por un auténtico apoyo a su desarrollo, ya que carecía de independencia administrativa y de los recursos necesarios.

A pesar de los esfuerzos iniciales y de otros posteriores, la ANEP solo ha llegado a cumplir algunos de los fines para los que fue creada. Es cierto que la evaluación preliminar (*ex ante*) de los proyectos de investigación ha constituido un factor clave para la asignación de recursos y para fomentar la cultura de la evaluación. Pero la crónica premura de tiempo con la que en muchos casos tiene que llevarse a cabo esta evaluación, la falta de actualización de los objetivos y la escasez de recursos han originado que se hayan ido implantando procedimientos burocráticos excesivamente formalizados y homogéneos.

Los criterios de evaluación para la asignación de recursos no siempre se adaptan a las particularidades de cada disciplina ni a las características propias de la actividad investigadora. Solicitar a los investigadores en el momento de presentar sus propuestas que especifiquen con detalle los resultados que van a alcanzar y el tiempo que tardarán en conseguirlo es un ejercicio que no se corresponde con la incertidumbre asociada a la investigación científica. Con frecuencia ocurre que las propuestas presentadas derivan a líneas de trabajo de las que se obtienen resultados que en un principio no se habían contemplado. En estas condiciones, tendría mucho más sentido valorar la capacidad investigadora del equipo y el interés de la propuesta.

Las dificultades en la evaluación preliminar de las propuestas (*ex ante*) se ven amplificadas al carecer de una evaluación rigurosa de los proyectos previamente finalizados (*ex post*), como un mecanismo ineludible de retroalimentación que proporciona información sobre los resultados obtenidos y las circunstancias que han incidido en ellos.

Los factores que subyacen a esta situación son de diferente naturaleza. La contradicción entre hablar de la importancia de la evaluación y luego no proporcionar los medios necesarios para llevarla a cabo ha sido la permanente paradoja del sistema. En estas condiciones sería urgente y necesario hacer un esfuerzo para revitalizar la labor de la ANEP, máxime en estos momentos en los que está siendo fagocitada por la Agencia Estatal de Investigación.

EL SISTEMA DE INFORMACIÓN: UN GRAN AUSENTE

Llegamos ahora a otra de las grandes debilidades de la ciencia española: la falta de un sistema de información sobre la gestión de la actividad científica, la evaluación de los resultados y el cumplimiento de los objetivos. Ello se debe a la ausencia de una cultura en la toma de decisiones políticas basadas en la información, que condiciona y empobrece el debate político.

Los sucesivos intentos de establecer un sistema de información útil para todos los agentes implicados en el diseño, gestión y ejecución de la política de I+D, sin olvidar a los ciudadanos, que, además de ser los contribuyentes, han de ser los beneficiarios de los resultados de la actividad científica, han sido baldíos. La información disponible sobre I+D+i no solo es escasa y obsoleta (no actualizada), sino que se halla fraccionada y distribuida por diferentes unidades de los departamentos públicos, lo que reduce enormemente su accesibilidad.

Resulta paradójico que en plena revolución digital, en la que la conexión, la información, los datos y su análisis constituyen la principal materia prima para el buen funcionamiento de cualquier empresa u organización, el sector público español en su conjunto, y en particular el sistema de ciencia, se muestren tan renuentes a incorporar estas prácticas de racionalidad, que resultan claves para asegurar la eficiencia y la eficacia del sistema, y para que los ciudadanos tengan una mayor percepción de los logros científicos y tecnológicos que, en gran medida, han sufragado con sus impuestos y de los que han de ser los beneficiarios.

¿SALDREMOS DEL ATOLLADERO?

Si bien el panorama general de la política científica española es desalentador, cabe decir que en los últimos veinte años también se han llevado a cabo algunas iniciativas y actuaciones exitosas. Destacan por su relevancia la Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados (ICREA), en Cataluña, y el IKERBASQUE, en el País Vasco. Ambas tienen como objetivo reforzar los respectivos sistemas de investigación mediante la captación de talento internacional y su incorporación en universidades y centros de investigación. En el ámbito nacional contamos con el programa Severo Ochoa, que apoya financieramente a los mejores centros de investigación, y las unidades de excelencia María de Maeztu. Se trata de iniciativas pensadas para respaldar la investigación de calidad a nivel internacional y con capacidad de atraer talento.

Pero una golondrina no hace verano. Si el nuevo Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades no aborda la solución de las carencias estructurales y abandona la visión cortoplacista que han marcado el rumbo de la ciencia española durante los últimos tiempos, de poco servirán las medidas o iniciativas aisladas. Si los gobernantes no incluyen de verdad la I+D+i en la agenda política, difícilmente podremos salir del atolladero actual y evitar el retorno a un pasado sombrío. Solo una visión de la ciencia como aliada del progreso permitirá vencer de una vez por todas el «enemigo» inmovilista que Moles intentaba combatir.

PARA SABER MÁS

Innovación en la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva. Aurelia Modrego en el *Boletín de la Sociedad Española de Biología Molecular*, n.º 140, junio de 2004.

Política Científica: De Ramón y Cajal a nuestros días. Luís Antonio Oro Giral. Discurso leído en el acto de nombramiento como miembro honorífico de la Real Academia de Medicina de Zaragoza. Instituto de España, 2017.

Informe sobre la ciencia y la tecnología en España. Coordinado por Vicente Larraga. Fundación Alternativas, Madrid, 2017.

Informes COSCE-DECIDES (Debates sobre Ciencia y Desarrollo Económico y Social), disponibles en **http://decides.cosce.org/informes**

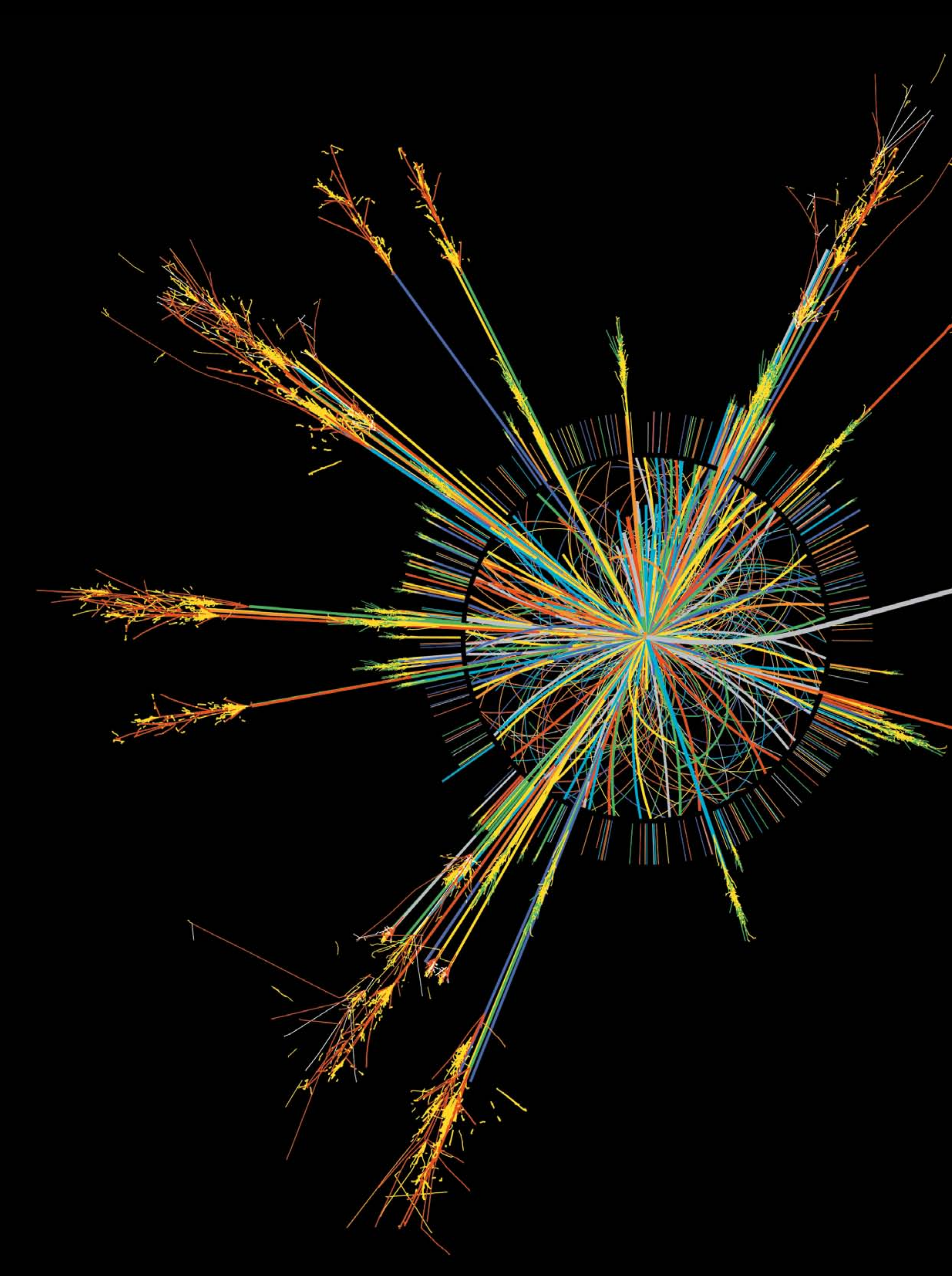
EN NUESTRO ARCHIVO

Más difícil todavía. Luis Sanz Menéndez en *IyC*, noviembre de 2012.

La innovación en España. José Molero en *IyC*, diciembre de 2013.

Retos del nuevo Ministerio de Ciencia. Anxo Sánchez en *IyC*, agosto de 2018.

Cómo mejorar la financiación de la investigación teórica. Miguel Navascués, *en este mismo número*.



EL CÓDIGO OCULTO DE LAS PARTÍCULAS

Nuevas herramientas matemáticas prometen revolucionar la manera de hacer cálculos en física de partículas

Matthew von Hippel



EXPERIMENTO ATLAS/CERN

EN SÍNTESIS

Para identificar nuevos fenómenos físicos en los aceleradores de partículas, como el LHC, los físicos deben primero calcular con gran precisión las predicciones teóricas, a fin de poder compararlas con los resultados experimentales.

Tradicionalmente, tales cómputos se han basado en diagramas de Feynman. A menudo, sin embargo, esta manera de proceder deriva en cálculos tan complejos que, en la práctica, resultan intratables.

En los últimos años, los físicos han descubierto que dichos cálculos poseen una estructura subyacente que permite enormes simplificaciones. Varios avances recientes en este campo podrían aplicarse pronto a los procesos que estudia el LHC.

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES (LHC) DEL CERN ES la mayor máquina jamás construida por el ser humano. En ella los protones se aceleran hasta alcanzar el 99,999999 por ciento de la velocidad de la luz. Cuando chocan, se descomponen en sus constituyentes básicos (quarks y gluones) y se crean partículas que antes no estaban ahí. Fue así como, en 2012, el LHC logró producir el bosón de Higgs, la última partícula que faltaba por encontrar de todas las predichas por el modelo estándar. Pero ahora los físicos esperan hallar algo genuinamente nuevo: partículas no contempladas por la teoría que, por ejemplo, expliquen la materia oscura u ofrezcan soluciones a otras preguntas. Esta tarea implica examinar los 30 petaoctetos de datos anuales que genera el LHC e identificar posibles desviaciones con respecto a las predicciones del modelo estándar. Sin embargo, todo ello será inútil si no sabemos con exactitud qué predice la teoría.

Es aquí donde entra mi trabajo. Las preguntas que le hacemos al LHC son probabilísticas: ¿con qué frecuencia dos protones rebotarán?, ¿cuál es la probabilidad de producir un bosón de Higgs? Para responderlas hemos de calcular «amplitudes de dispersión»: fórmulas complejas que establecen con qué frecuencia las partículas «se dispersan» (básicamente, rebotan) de cierta manera. Formo parte de un grupo de físicos y matemáticos que trabajan para mejorar los engorrosos métodos que usaban nuestros predecesores. Nos hacemos llamar «amplitudólogos».

El origen de esta área se remonta a las investigaciones de dos físicos: Stephen Parke y Tomasz Taylor. En 1986, estos investigadores dieron con una fórmula única para describir colisiones de cualquier número de gluones. Ello simplificaba lo que normalmente serían páginas de cuidadosos cálculos. El campo terminó de arrancar entre los años noventa y principios de este siglo, cuando una serie de nuevos métodos prometió optimizar una gran variedad de cómputos. Hoy, la amplitudología se halla en auge. El año pasado, el congreso anual del ramo atrajo a 160 participantes. Y la escuela de verano de la semana previa, dirigida a jóvenes investigadores, reunió a 100. Incluso hemos captado cierta atención pública: el «amplituhedro» de los físicos Nima Arkani-Hamed y Jaroslav Trnka, una forma de describir ciertas amplitudes en términos geométricos, fue noticia en 2013. Y Sheldon Cooper, el protagonista de *The big bang theory*, también ha hecho incursiones en la amplitudología.

En fecha reciente hemos dado un gran paso adelante. Hemos desarrollado técnicas que nos están llevando a un terreno lo bastante sensible para ajustarnos a la creciente precisión del LHC. Tales herramientas harían posible detectar minúsculas diferencias entre las predicciones del modelo estándar y los datos. De ocurrir así, eso ayudaría a descubrir las nuevas partículas con las que sueñan los físicos.

LÍNEAS Y BUCLES

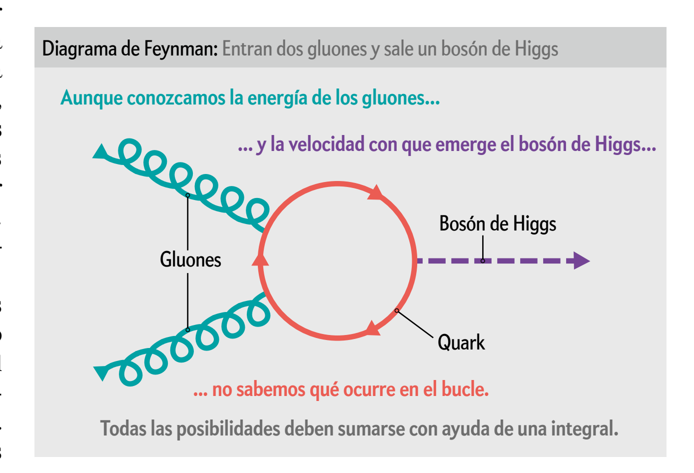
Para organizar nuestros cálculos, hace décadas que los físicos de partículas usamos una clase de dibujos conocidos como diagramas de Feynman. Concebidos por Richard Feynman en 1948, estos esquemas representan trayectorias de partículas. Supongamos que deseamos calcular la probabilidad de que dos gluones se fusionen y den lugar a un bosón de Higgs. En tal caso, comenzaremos trazando las líneas correspondientes a dichas partículas: dos gluones que entran y un bosón de Higgs que sale. Luego, habremos de conectarlas dibujando más trayectorias en el centro del diagrama, lo que debe hacerse respetando ciertas reglas que nos dicta el modelo estándar. Esas partículas adicionales son «virtuales»; es decir, no se trata de partículas en la forma literal en que lo son los gluones y el bosón de Higgs. Antes bien, podemos entenderlas como una «taquigrafía»: una forma de seguir la pista a las distintas maneras en las que pueden interaccionar entre sí los campos cuánticos.

Pero los diagramas de Feynman son algo más que imágenes bonitas; codifican instrucciones que nos indican cómo calcular probabilidades. Si conocemos la velocidad y la energía de los gluones y del bosón de Higgs, podemos averiguar las propiedades de las partículas virtuales que median entre ellos. A veces, sin embargo, la respuesta es incierta. Al seguir la trayectoria de las partículas intermedias, podemos encontrarnos con un bucle, un camino que nos lleva al punto donde comenzamos. Una partícula que quede representada por una trayectoria así no es entrante ni saliente: sus propiedades nunca llegan a medirse, por lo que no podemos conocer su velocidad ni su energía. Aunque esto pueda parecer extraño, se trata de una consecuencia de la incertidumbre fundamental de la mecánica cuántica. No obstante, la teoría nos dice cómo lidiar con ella: hemos de tomar en cuenta todas las opciones, sumando las probabilidades asociadas a todas las velocidades y energías que podamos asignar a la partícula virtual. Esto se consigue gracias a una técnica que usted tal vez recuerde de la escuela secundaria: una integral.

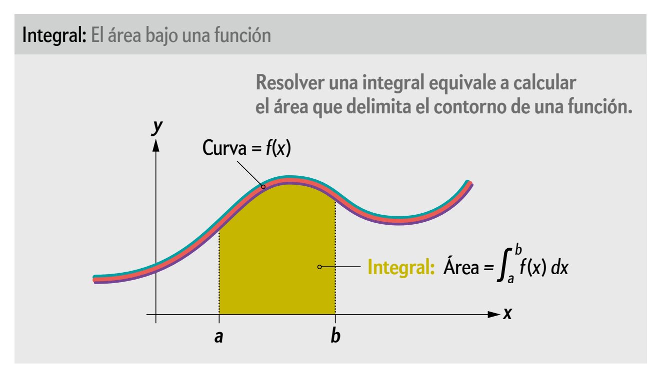


Matthew von Hippel trabaja en la Academia Internacional Niels Bohr de Copenhague. Su investigación se centra en el cálculo de amplitudes de dispersión en física de partículas. Es autor del blog *4 gravitons* (4gravitons.wordpress.com).

Diagrama de Feynman: Entran dos gluones y sale un bosón de Higgs



Integral: El área bajo una función

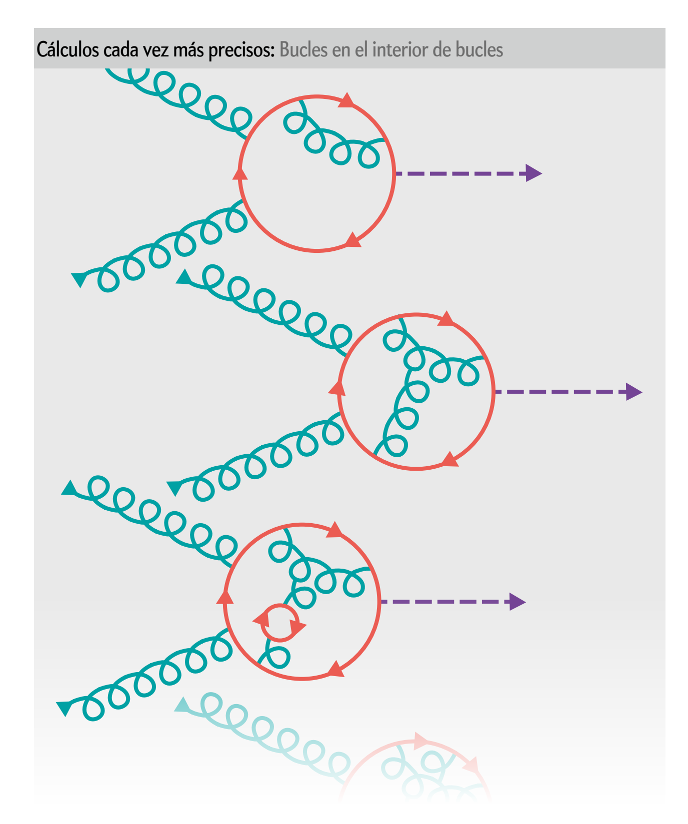


En principio, para calcular una amplitud hemos de comenzar dibujando todos los diagramas posibles: todas las formas en que las partículas iniciales (los gluones, en nuestro ejemplo) puedan convertirse en el producto final (el bosón de Higgs). Eso supone una multitud de diagramas. De hecho, una cantidad infinita, ya que en el interior de cada bucle siempre podremos añadir tantos bucles más como deseemos, lo que nos obligaría a calcular integrales cada vez más complicadas.

En la práctica, sin embargo, hay algo que nos salva de tener que hacer ese número infinito de cálculos: la débil intensidad de las interacciones cuánticas. Cuando dos líneas de un diagrama de Feynman se cortan, el punto donde lo hacen representa una interacción entre las partículas. En tal caso hemos de multiplicar el resultado por una constante relacionada con la intensidad de la interacción. En el electromagnetismo, dicha constante vale aproximadamente 1/137. Por tanto, en un diagrama con múltiples bucles, habremos de dividir repetidas veces entre 137,

JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

Cálculos cada vez más precisos: Bucles en el interior de bucles



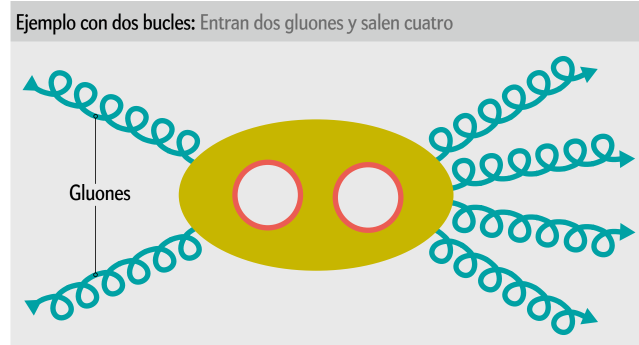
por lo que este contribuirá con una proporción muy baja al resultado final. Llegados a cierto punto, la contribución de los diagramas con muchos bucles será tan pequeña que los experimentos no podrán detectarla. En electromagnetismo, los experimentos más refinados obtienen resultados de hasta 10 cifras decimales (esto incluye algunas de las mediciones más precisas de la historia de la ciencia). Para llegar a esa resolución en los cálculos, bastan «solo» cuatro bucles: cuatro factores de 1/137. Más allá, estaremos calculando correcciones más pequeñas de lo que podemos medir. En numerosos casos, tales cálculos se han llevado a cabo y sus 10 cifras decimales coinciden con el resultado experimental.

La interacción nuclear fuerte, la que mantiene unidos a los quarks en el interior del protón, es algo más dura de roer. Es bastante más intensa que el electromagnetismo: en los cálculos relevantes para el LHC, cada bucle implica dividir no entre 137, sino entre 10. Como consecuencia, obtener 10 dígitos de precisión supondría considerar diagramas con hasta 10 bucles.

Aquí el LHC no alcanza la precisión de los experimentos de electromagnetismo. De momento, sus mediciones solo están empezando a coincidir con la precisión de los cálculos a dos bucles. Sin embargo, tales resultados son ya muy engorrosos. Por ejemplo, un cálculo a dos bucles realizado en 2010 por los físicos Vittorio Del Duca, Claude Duhr y Vladimir Smirnov determinaba la probabilidad de que, en una colisión de dos gluones, emergieran cuatro. Recurrieron a una teoría simplificada que hacía uso de algunos atajos y, aun así, el resultado llenaba 17 páginas de complejas integrales. Y esa longitud no sorprendió a nadie: todo el mundo sabía que los cálculos a dos bucles eran costosos.

No obstante, pocos meses después otro grupo logró escribir el mismo resultado en solo dos líneas. El hito llegó de la mano de tres físicos, Marcus Spradlin, Cristian Vergu y Anastasia Volovich; y un matemático, Alexander B. Goncharov. El truco que

Ejemplo con dos bucles: Entran dos gluones y salen cuatro



usaron descubrió a los amplitudólogos un área de las matemáticas que la mayoría de nosotros no había visto antes; una que ha impulsado mi carrera hasta hoy.

PERÍODOS Y LOGARITMOS

Muéstrele a un matemático como Goncharov una de las integrales que se obtienen en los diagramas de Feynman y le dirá: «Eso es un período».

Los períodos son un tipo de número. Usted seguramente esté familiarizado con los números enteros (1, 2, 3, 4...) y con los racionales (fracciones de enteros). La raíz cuadrada de 2 no es racional, ya que no puede obtenerse dividiendo enteros. Sin embargo, es un número algebraico, ya que sí podemos escribir una ecuación algebraica, como $x^2 = 2$, cuya solución sea $\sqrt{2}$. Los períodos van un paso más allá: aunque tal vez no sea posible obtenerlos a partir de una ecuación algebraica, siempre podemos expresarlos como una integral.

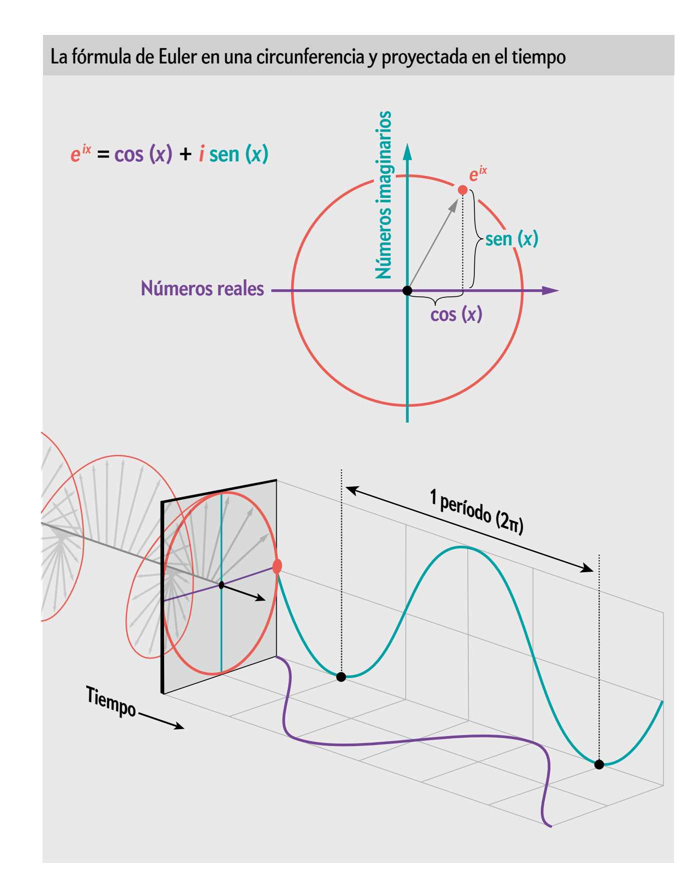
¿Por qué llamarlos períodos? En los casos más sencillos, es lo que son: la distancia que hay que recorrer antes de que algo se repita. Volviendo a la secundaria, tal vez recuerde haber trabajado con senos y cosenos, y que esas funciones se relacionaban con los números imaginarios (las raíces cuadradas de números negativos) mediante la fórmula de Euler: $e^{ix} = \cos(x) + i\,\mathrm{sen}(x)$, donde i denota la raíz de –1. Las funciones e^{ix}, $\cos(x)$ y $\mathrm{sen}(x)$ tienen período 2π: cada vez que aumentamos el valor de la variable x en 2π, el resultado se repite.

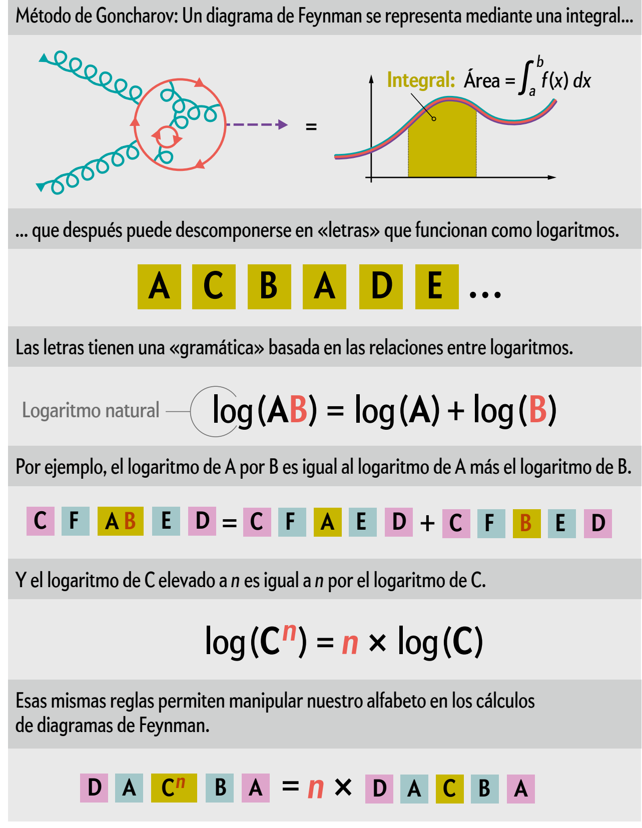
Fórmula de Euler: Funciones periódicas y números complejos

$$e^{ix} = \cos(x) + i\,\mathrm{sen}(x)$$

Decimos que 2π es un período porque denota la distancia que puede avanzar la variable x antes de que e^{ix} se repita. Sin embargo, puede verse también como una integral. Si dibujamos la gráfica de e^{ix} en el plano complejo (en el que un eje corresponde a los números reales y el otro a los imaginarios), veremos que forma una circunferencia de radio uno. Y, si deseamos medir su longitud, podremos hacerlo con una integral, la cual equivale a descomponer la circunferencia en numerosas porciones pequeñas y sumar sus longitudes. Al hacerlo, obtendremos el valor 2π.

¿Qué ocurre si nos detenemos en algún punto intermedio de la circunferencia, z? En tal caso, dicho punto obedecerá la ecuación $z = e^{ix}$. Y, regresando de nuevo a la secundaria, recordará que para resolver este tipo de ecuaciones necesitamos usar el logaritmo natural: $\log(z)$. Puede que un logaritmo no





se parezca tanto a un período como 2π. Pero, dado que suelen obtenerse como resultado de integrales, los matemáticos los llaman así. Después de 2π, los logaritmos son los períodos más simples que existen.

Sin duda, los períodos que interesan a físicos y matemáticos pueden alcanzar un grado de complejidad mucho mayor. A mediados de los años noventa, los físicos comenzaron a clasificar los períodos que aparecían en las integrales asociadas a diagramas de Feynman; desde entonces, han encontrado una enorme cantidad de números exóticos. Sin embargo, las lecciones de la secundaria siguen siendo útiles: muchos de esos números, cuando se consideran como períodos, pueden descomponerse en logaritmos. Por tanto, si entendemos los logaritmos podremos entender casi todo lo demás.

Eso fue lo que Goncharov enseñó a Spradlin, Vergu y Volovich. Les mostró cómo convertir las 17 páginas de Del Duca, Duhr y Smirnov en una especie de «alfabeto» de logaritmos. Ese abecedario obedece su propia «gramática», basada en las relaciones entre logaritmos, y, al usarla, los físicos fueron capaces de reescribir el resultado en términos de unas pocas «letras». Gracias a ello, el engorroso cálculo de física de partículas se convirtió en algo muchísimo más simple.

Recapitulemos. Los cálculos en física de partículas se efectúan mediante diagramas de Feynman, lo que implica resolver difíciles integrales. Estas corresponden a períodos, en ocasiones intrincados. Sin embargo, a menudo estos pueden descomponerse en otros más simples (logaritmos) usando la técnica de Goncharov. Por tanto, muchas de esas integrales pueden expresarse en un alfabeto cuyas letras se comportan como logaritmos. Y las mismas reglas simples que se aplican a estas funciones, como $\log(xy) = \log(x) + \log(y)$ o $\log(x^n) = n\log(x)$, son válidas para nuestro abecedario.

PALABRAS REVUELTAS

El truco de Goncharov no revestiría tanta importancia si su única ventaja fuese ahorrar espacio en una revista científica. Pero, una vez que conocemos el alfabeto correcto, podemos hacer cálculos que serían intratables de otra manera. Eso nos permite sortear los diagramas de Feynman y adivinar el resultado.

Piense en el juego de las palabras revueltas. En él se nos presentan, desordenadas, las letras de una palabra que hemos de adivinar. Si somos perezosos, podemos programar un ordenador para que pruebe con todas las combinaciones posibles y luego revisar la lista. Si hacemos eso antes o después daremos con la palabra correcta; no obstante, la lista de posibilidades puede ser enorme.

Por fortuna, en física contamos con algunas pistas. Comenzamos con un alfabeto de logaritmos que describen las propiedades que pueden tener nuestras partículas, como su energía y velocidad. Después empezamos a escribir palabras en este alfabeto, las cuales representan las integrales que pueden aparecer en nuestro resultado final. Sin embargo, a menudo hay palabras que carecen de sentido físico: describen partículas que no existen o diagramas que sería imposible dibujar. Otras son necesarias para explicar cosas que ya sabemos, como qué ocurre cuando una partícula adquiere una velocidad muy grande o muy pequeña. Al final, podemos reducir millones de posibles

Palabras revueltas: Ordene las letras

OOLSNACDIIRO

TPSIALCUAR

TOGRMAISOL

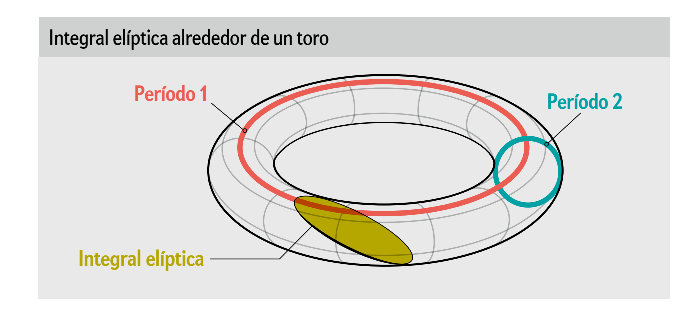
palabras a solo miles, luego a decenas y, por último, a una única respuesta. Comenzando con una suposición, acabamos con la única palabra que cobra sentido como amplitud.

En 2011, Lance J. Dixon, James M. Drummond y Johannes Henn usaron esta técnica para encontrar la «palabra» correcta asociada a un cálculo de tres bucles. Me uní al ellos en 2013, cuando dejé mi escuela de doctorado para unirme a Dixon en Stanford. Junto con el entonces estudiante de posgrado Jeffrey Pennington, obtuvimos el resultado en una forma que nos permitió compararlo con el cálculo a dos bucles de Del Duca, Duhr y Smirnov. Ahora, en lugar de 17 páginas, teníamos una fórmula de 800 páginas, y todo ello sin dibujar un solo diagrama de Feynman.

Desde entonces hemos avanzado hacia cálculos con más bucles, y a nuestro equipo se han unido Duhr, Andrew McLeod, Simon Caron-Huot, Georgios Papathanasiou y Falko Dulat. Ya vamos por siete bucles, y no sabemos cuántas páginas harán falta para escribir el resultado. El truco de Goncharov no basta para simplificar las fórmulas en casos tan elaborados. Sin embargo, ¡hemos logrado que el cálculo sea *posible*! Nuestros resultados están almacenados en ficheros informáticos tan grandes que uno pensaría que son de vídeo, no de texto.

LA FRONTERA ELÍPTICA

Recordemos que, cuantos más bucles se incluyan en el cálculo de una amplitud, más precisa será la predicción. Siete bucles serían más precisos que los dos o tres que el LHC puede medir, y más que los cálculos a cuatro bucles del electromagnetismo. No obstante, digo «serían» porque hay un truco: nuestros cómputos a siete bucles se basan en lo que los físicos llamamos un «modelo de juguete», una teoría de partículas más sencilla que las que describen el mundo real. Adaptar nuestros cálculos para que se ajusten a los experimentos del LHC exige entender varias cuestiones; la primera de ellas, las denominadas «integrales elípticas».



Una de las ventajas de nuestro modelo simplificado es que siempre resulta posible aplicar la técnica de Goncharov: nuestras integrales pueden expresarse siempre en un alfabeto de logaritmos; es decir, de integrales sobre circunferencias. Pero, en el mundo real, este método presenta problemas cuando llegamos a dos bucles. En tal caso, dos integrales pueden entremezclarse de tal manera que no hay forma de separarlas.

Piense en dos anillos enganchados. Si mueve uno alrededor del otro, barrerá una superficie con forma de rosquilla, un «toro», en jerga matemática. Esta superficie cuenta con dos períodos: dos formas diferentes de dibujar una circunferencia a su alrededor. Si integramos a lo largo de una de ellas, obtendremos un logaritmo. Pero, si intentamos rodear el toro de otra manera, en general describiremos una elipse. En tal caso, las integrales asociadas reciben el nombre de integrales elípticas.

La resolución de integrales elípticas conduce a algunos problemas matemáticos famosos por su complejidad. Algunos revisten tanta dificultad que organismos como la Agencia Nacional de Seguridad de EE.UU. se basan en ellos para cifrar información secreta, ya que dan por sentado que nadie será capaz de resolverlos lo suficientemente rápido. Los problemas que nos interesan no son tan intrincados, pero siguen siendo muy difíciles. Sin embargo, la creciente precisión del LHC está haciendo que las integrales elípticas sean cada vez más necesarias. En 2018, el LHC detuvo sus operaciones para ser sometido a mejoras técnicas. Pero aún quedan montañas de datos por analizar. Y cuando reanude sus operaciones, en 2021, el número de colisiones se multiplicará por diez.

Esta línea de investigación está progresando con enorme rapidez. El invierno pasado me encerré en la Universidad de Princeton con McLeod, Spradlin, Jacob Bourjaily y Matthias Wilhelm. En dos semanas, convertimos el bosquejo esquemático de un cálculo en un artículo en el que computábamos una amplitud con integrales elípticas. Nunca en mi vida había escrito algo tan deprisa. Aun así, nos preocupaba que algún otro grupo lo publicase antes que nosotros. Eso no ocurrió, pero, no mucho después, recibimos un regalo de Navidad anticipado: dos artículos de Duhr, Dulat, Johannes Broedel y Lorenzo Tancredi que explicaban cómo manejar mejor esas integrales usando ciertos resultados de los matemáticos Francis Brown y Andrey Levin. Esos trabajos, así como uno posterior junto con Brenda Penante, nos dieron la pieza que nos faltaba: un nuevo alfabeto de «letras elípticas».

Con un abecedario así podemos aplicar el truco de Goncharov a integrales más complejas y comenzar a entender las amplitudes a dos bucles no solo en nuestro modelo simplificado, sino también en el mundo real. Averiguar lo que vaticina el modelo estándar con un nuevo nivel de precisión nos permitirá comprobar si los resultados del LHC coinciden o no con las predicciones. Si no es así, tendremos la señal de que algo realmente nuevo está sucediendo. Esa podría ser la clave para llevar la física de partículas a la siguiente frontera, para resolver esos misterios tan persistentes que no parecemos poder descifrar.



PARA SABER MÁS

Classical polylogarithms for amplitudes and Wilson loops. Alexander B. Goncharov et al. en *Physical Review Letters*, vol. 105, art. n.º 151605; octubre de 2010.

Bootstrapping six-gluon scattering in planar $N = 4$ super-Yang-Mills theory. Lance J. Dixon et al. 12.º Encuentro en DESY sobre Física de Partículas Elementales; Weimar, abril-mayo de 2014. Versión disponible en **arxiv.org/abs/1407.4724**

EN NUESTRO ARCHIVO

La física y los diagramas de Feynman. David Kaiser en *IyC*, septiembre de 2005.

Árboles, bucles y nueva física. Zvi Bern, Lance J. Dixon y David A. Kosower en *IyC*, julio de 2012.



«LOS TELÓMEROS NO SON BOLAS DE CRISTAL»

La premio nóbel Elizabeth Blackburn advierte sobre las limitaciones de emplear los extremos de los cromosomas como predictores de la salud

Michaela Maya-Mrschtik y Frank Schubert

EN SÍNTESIS

Elizabeth Blackburn fue galardonada en 2009 con el premio Nobel de medicina por sus investigaciones sobre los telómeros. Estos segmentos de ADN localizados en los extremos de los cromosomas se acortan cada vez que la célula se divide, por lo que son indicadores útiles de la senescencia celular.

En esta entrevista habla sobre cómo la longitud de los telómeros informa de la probabilidad de padecer una enfermedad o del riesgo de muerte. Sin embargo, el parámetro varía en función de numerosos factores, por lo que advierte sobre las limitaciones de emplear su medida para predecir la salud y la longevidad de una persona.



En 2009, la bióloga molecular Elizabeth Blackburn recibió, junto con Carol Greider y Jack Szostak, el premio Nobel de fisiología y medicina por descubrir que los cromosomas están protegidos por los telómeros y la enzima telomerasa. En la entrevista que transcribimos a continuación, realizada durante la Reunión de Premios Nobel en Lindau (Alemania) de 2018, habla sobre cómo la longitud de los telómeros influye en la salud, las enfermedades y la esperanza de vida.

Profesora Blackburn, en 1996, en un artículo de* Investigación y Ciencia *escribió que nuestras células somáticas solo pueden dividirse hasta cierto punto porque sus telómeros se acortan con cada división celular. ¿Ha cambiado hoy su visión, 22 años después?
Aquel planteamiento se ha confirmado. Y la reducción de los telómeros tiene consecuencias para nosotros, los humanos, como se ha comprobado en estos años. Esta pérdida opera a lo largo de toda la vida humana, es decir, durante decenios. Aunque las células disponen de un mecanismo que prolonga los telómeros, su acortamiento progresivo no compensa, ni siquiera el de muchos tipos de células madre. En todo el organismo se acumulan cada vez más células con telómeros reducidos que dejan de funcionar y dividirse y, como dicen los biólogos, entran en senescencia. Por supuesto, esto no afecta a todas las células del cuerpo, sino solo a una parte.

¿Qué significa eso para nosotros?

Numerosos estudios genéticos y epidemiológicos, así como de intervención, han revelado que estos procesos influyen en el riesgo de contraer alguna de las enfermedades más comunes de la población y de la vejez, como las complicaciones cardiovasculares, la demencia o el cáncer. Sin embargo, la longitud de los telómeros es solo uno de los muchos factores que determinan la probabilidad de una enfermedad de este tipo. Lo que me parece particularmente interesante son los procesos que aceleran o retrasan el acortamiento de los telómeros. Hoy está bastante claro que el estrés celular crónico desempeña un papel importante: puede surtir efectos fisiológicos complejos y duraderos. Las consecuencias que ello tendrá para la esperanza de una vida saludable y cómo afectará cuantitativamente a las poblaciones humanas constituyen un enigma fascinante. El hecho de que ahora nos centremos en él y ya no estemos investigando el acortamiento molecular de los telómeros forma parte de los progresos realizados en los últimos 22 años.



LA BIÓLOGA MOLECULAR Elizabeth Blackburn es actualmente catedrática de biología y fisiología en la Universidad de California en San Francisco.

JULIA NIMKE/LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS

¿Indican los telómeros nuestra edad biológica verdadera?

La relación es solo estadística. Los telómeros no son bolas de cristal que auguran si una persona fallecerá al año siguiente. Muchos de los que creen deducir información personal del análisis individual de los telómeros sufren este malentendido. Sin embargo, las evaluaciones estadísticas muestran correlaciones claramente cuantificables entre la longitud de los telómeros y la mortalidad o el riesgo de enfermedades futuras. De ello pueden inferirse, por ejemplo, recomendaciones sobre políticas en materia de salud. Podría equipararse con el problema del tabaquismo: no puede afirmarse con total seguridad que el fumador morirá por un cáncer de pulmón, pero los estudios de población muestran claramente un mayor riesgo de cáncer asociado a ese hábito. Este resultado indica de forma inequívoca la conveniencia de implementar políticas para reducir el consumo de tabaco.

Entonces, ¿el acortamiento de los telómeros no equivale a una disminución de la longevidad?

La velocidad a la que corre nuestra vida varía mucho. Hay numerosos factores que influyen en la rapidez con la que desaparecen los telómeros. Por lo tanto, la analogía no es muy buena, porque sugiere un paso uniforme del tiempo. Los sucesos en torno a los telómeros son bastante más dinámicos. Parece más adecuado combinar las mediciones de los telómeros con otros parámetros. Si, por ejemplo, se detectan telómeros reducidos en la sangre de un paciente con cáncer de vejiga en el momento del diagnóstico, ese resultado en sí mismo no dice mucho sobre la progresión de la enfermedad, igual que la presencia de síntomas depresivos por sí solos tampoco permite deducir un pronóstico. Sin embargo, si los telómeros acortados concurren con síntomas de depresión, el riesgo de mortalidad aumenta de forma notable, según se ha demostrado.

Compañías como TeloYears, en California, y Life Length, en Pensilvania, ofrecen medir la longitud personal de los telómeros previo pago. La medida, según dicen, se corresponde con la edad celular del cliente y es un indicador de salud. Estas empresas también ofrecen asesoramiento sobre hábitos de vida para preservar los telómeros.

El método de medición es bueno, pero la interpretación de los resultados se antoja absurda. Fui cofundadora de la empresa que más tarde se convirtió en TeloYears. Pero la abandoné más tarde, porque por desgracia tomó un derrotero comercial poco sensato, una lástima. Puesto que la distribución de la longitud de los telómeros de la mayoría de los octogenarios se solapa con la de las personas de 30 años, ¿qué podemos deducir entonces?

Ha escrito que la longitud de los telómeros en los humanos puede variar de un año a otro.

Sí, por supuesto. Se trata de un proceso dinámico. La tendencia general se dirige al acortamiento; esta es la parte estadística que estamos estudiando. Sin embargo, siempre hay desviaciones hacia arriba y hacia abajo.

¿Se activa también la telomerasa en las células somáticas diferenciadas?

Sí, pero la actividad de la telomerasa está regulada de una manera muy compleja. En las células inmunitarias, por ejemplo, disminuye cuando actúan las hormonas del estrés. Las actividades alta y baja de la enzima pueden tener una serie de consecuencias distintas en los diferentes tipos de cáncer. En las enfermedades cardiovasculares, la situación está más clara: el acortamiento de los telómeros se asocia a un aumento de los procesos inflamatorios. Por lo tanto, las mediciones de la longitud de los telómeros pueden utilizarse para esclarecer las reacciones inflamatorias y el curso de la enfermedad, y los telómeros cortos se relacionan estadísticamente con un mayor riesgo de enfermedad cardiovascular.

Los traumas de la infancia también están claramente relacionados con un acortamiento permanente de los telómeros.
Eso es cierto. Examinemos la situación de la frontera entre México y EE.UU. Miles de niños fueron separados de sus padres después de entrar ilegalmente en EE.UU. Para los niños afectados, se trata de un trauma clásico con consecuencias a largo plazo que podemos medir desde un punto de vista fisiológico, no solo psíquico.

Ya en su artículo de 1996 en* Investigación y Ciencia*, describió que las células tumorales exhiben una mayor actividad de la telomerasa, por lo que invierten la senescencia celular y se tornan potencialmente inmortales. ¿Puede aprovecharse este conocimiento para tratar el cáncer y, de ser así, cómo?
Varias compañías están investigando sustancias que inhiben específicamente la actividad de la telomerasa. En mi opinión, este es un planteamiento que debería explorarse de forma más activa. Sin embargo, si el paciente se ha sometido a quimioterapia intensiva, el sistema de formación de la sangre a menudo ya está dañado, estando especialmente afectados los telómeros de las células sanguíneas y las células madre del sistema inmunitario. Estas células necesitan la telomerasa, por lo que la inhibición de la enzima tiene numerosas consecuencias. En pacientes con estadios avanzados de la enfermedad, cuyo sistema inmunitario se halla gravemente alterado por la quimioterapia, se han observado efectos secundarios inaceptables con este método. Sin embargo, considero que se trata de un concepto interesante, que aún no se ha investigado de manera suficiente.

¿Existen estudios clínicos sobre el tema?
Ha habido algunos, pero se han observado reacciones adversas. Si el sistema inmunitario se ve afectado, aparecen numerosos problemas. Por esta razón, el tratamiento dirigido a la telomerasa no debería dañar en exceso las células madre del sistema de formación de la sangre. Debemos encontrar una ventana terapéutica, como con cualquier otro medicamento. Hasta ahora no se ha tenido éxito, pero estamos solo en la fase inicial.

¿Qué papel desempeñan los telómeros o las telomerasas en la biología sintética, a la hora de construir organismos artificiales?
Las bacterias no necesitan telómeros porque tienen cromosomas anulares. Tampoco la mosca de la fruta, que emplea heterocromatina para formar casquetes cromosómicos protectores. Hay algunos organismos que, por razones evolutivas, han creado tales atajos. Sin embargo, la gran mayoría de los eucariotas, entre ellos los protozoos, las levaduras y las plantas, utilizan el mecanismo de la telomerasa. Por lo tanto, en algunos casos es posible concebir organismos artificiales sin telómeros, al menos con el nivel de complejidad de la mosca de la fruta. Los mamíferos pueden reparar los telómeros por recombinación genética sin la participación de la telomerasa. Pero ningún ser humano ha nacido sin telomerasa, y los ratones solo sobreviven unas pocas generaciones sin esta enzima.

Usted ha abandonado la presidencia del Instituto Salk de Estudios Biológicos, en California, para involucrarse más en la política. ¿Por qué?
He trabajado como investigadora durante unos cincuenta años, he recibido el premio Nobel, y este año cumpliré setenta. Durante décadas casi no he hecho otra cosa sino investigar. Por supuesto, todavía me gusta la ciencia y, como presidenta, estoy muy comprometida con la investigación básica. Pero ha llegado la hora de preguntarme cómo quiero seguir. En el futuro deseo participar más en los foros y los consejos, sobre todo para apoyar la investigación básica y especializada del cáncer, en la que estoy muy interesada, entre otras cosas, debido a mis estudios sobre los telómeros. Hoy en día, sabemos mucho sobre los procesos cancerígenos. Los factores que influyen en la longitud de los telómeros ejercen un papel importante: la actividad física regular, una dieta saludable, el abandono del hábito de fumar, etcétera. La mitad de todos los tumores podrían evitarse con estas medidas. Comunicar este mensaje a un público más amplio y promover la investigación es lo que quiero hacer en el tiempo que me queda. No creo que nadie pueda realizar una investigación de alto nivel toda su vida. Simplemente, ya no soy tan rápida como mis jóvenes colegas.

Usted ya participa activamente en el asesoramiento científico del demócrata estadounidense Joe Biden y en el proyecto benéfico estadounidense Unidos Contra El Cáncer. ¿Piensa participar también en alguna consultoría científica fuera del país?
Mi trabajo tiene un ámbito universal. La ciencia no conoce nacionalidades ni se limita a países concretos. Participo en varios consejos consultivos científicos europeos, por lo que parte de mi trabajo ya se está llevando a cabo en Europa. Unidos Contra El Cáncer también coopera con iniciativas relacionadas con la ciencia de otros países, por ejemplo con la organización británica sin ánimo de lucro Cancer Research UK. Gracias a fondos recaudados de manera conjunta, apoya a investigadores de todo el mundo, incluso de fuera de EE.UU.

Una última pregunta: ¿hacia dónde se orientan actualmente las principales líneas de desarrollo en biología? ¿Cuáles son para usted los temas de investigación más interesantes para el futuro próximo?
Hay tantas otras cosas que desconocemos... Quiero decir, para mí la mayor fascinación la ejerce el cerebro, este órgano de un kilo y medio que todavía eclipsa incluso a la computadora más poderosa. Nos esperan muchos descubrimientos interesantes en la investigación del cerebro. Esta es la única razón, por cierto, por la que me gustaría vivir más tiempo: aprender más sobre este fascinante órgano. También encuentro un tema muy atrayente la interacción entre personas y máquinas, ya que la combinación de ambas brinda un enorme potencial. IyC

Michaela Maya-Mrschtik y Frank Schubert *son redactores de las publicaciones alemanas* Gehirn&Geist *y* Spektrum der Wissenschaft*, respectivamente.*

PARA SABER MÁS

Telómeros, telomerasa y cáncer. Carol W. Greider y Elizabeth H. Blackburn en *IyC*, abril de 1996.
Medir la salud celular. Thea Singer en *IyC*, diciembre de 2011.
Los costes sociales del estrés. Eizabeth H. Blackburn y Elissa S. Epel en *IyC*, agosto de 2013.

por Marc Boada Ferrer



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

El efecto Faraday

Un maravilloso ejercicio de física experimental e historia de la ciencia a nuestro alcance

El día 13 de septiembre de 1845, Michael Faraday (1791-1867) descubre, por fin, una relación o, mejor, una interacción entre el campo magnético y la luz. Decimos «por fin» porque Faraday llevaba décadas obsesionado con encontrar nexos físicos entre el magnetismo, la electricidad, el movimiento y la luz.

Situémonos en la época. Todo entonces estaba por hacer. Tan solo algunos lustros antes se había presentado la pila eléctrica (Volta, *ca.* 1800), se había observado el campo magnético producido por un conductor (Oersted, *ca.* 1820) y demostrado la inducción electromagnética (Faraday, *ca.* 1831). Nuestro protagonista estaba convencido de que algún efecto había de producirse en un rayo de luz al atravesar un medio diamagnético transparente bajo el efecto del campo magnético de un potente imán.

Su experimento fue sencillo. Sobre las zapatas polares de un electroimán puso una pequeña barra de vidrio al plomo. La atravesó con un rayo de luz polarizada, que extinguió con un segundo polarizador (luego explicaremos esto en detalle). Finalmente, comprobó que, conectando o desconectando el electroimán, la luz emergía o no tras el último filtro.

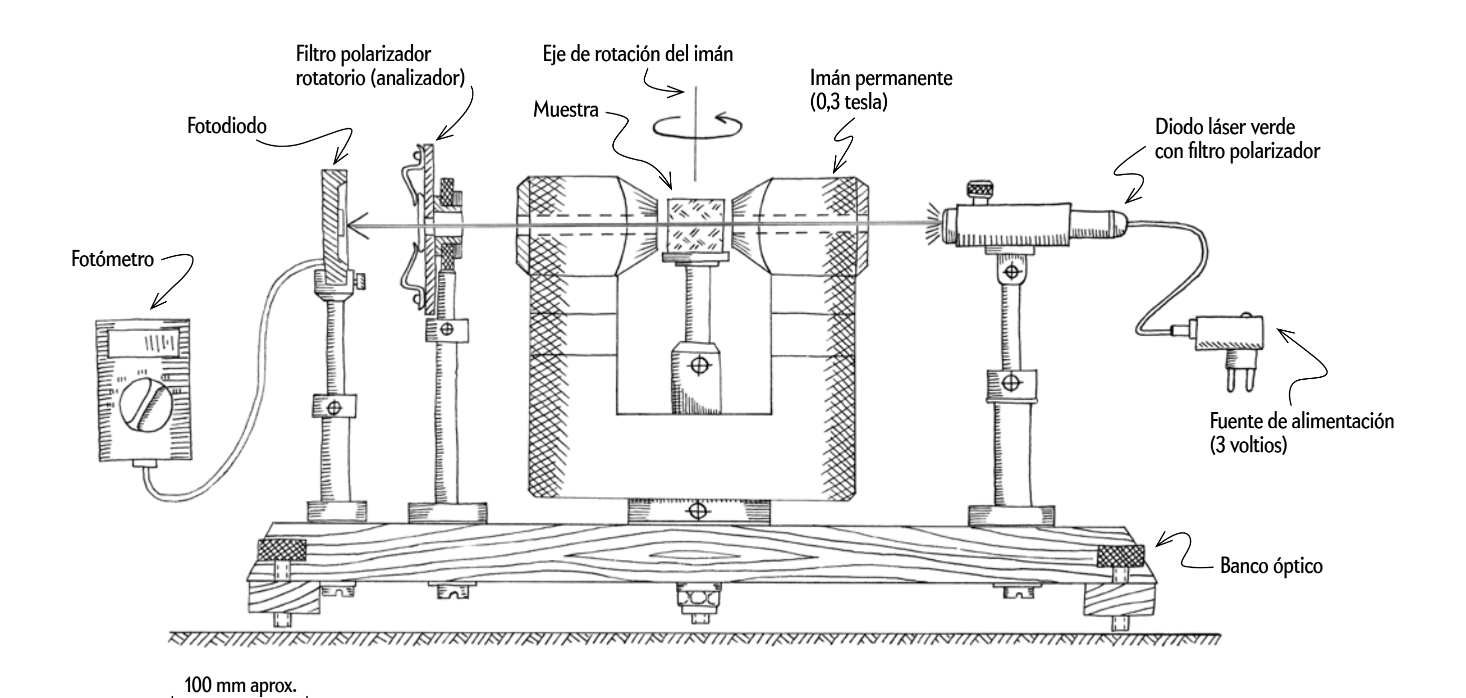
El experimento de Faraday puede ser simple, pero no es obvio. Los materiales ópticos que hacen rotar el plano de polarización de la luz que los atraviesa son pocos, y los resultados, sutiles. Por otro lado, el científico tampoco disponía de campos magnéticos potentes; los imanes permanentes de la época eran ridículos en comparación con los actuales y, para rematar, un electroimán de herradura no facilita en nada la observación, ya que las propias zapatas polares se interponen en el camino óptico.

En esta colaboración nos proponemos repetir el experimento de Faraday utilizando los preciosos materiales que el mercado pone hoy en nuestras manos. Pero antes de empezar a construir, hagamos un somero repaso a la física del efecto Faraday.

Como decíamos, para poner de manifiesto toda esta fenomenología uno debe situar un medio óptico en el seno de un campo magnético y atravesarlo con un rayo de luz. Pero este rayo debe proceder de un manantial de luz polarizada. Expliquémonos. La luz se propaga mediante ondas; es decir, oscilaciones periódicas. Es por ello por lo que solemos dibujarla sobre el papel en forma de onda plana. Pero, en realidad, la ondulación de la radiación luminosa es tridimensional. (Un amigo, físico de profesión, compara un rayo de luz con una sarta de morcillas cortas y regordetas.) Polarizar la luz significa hacer atravesar esa retahíla de oscilaciones tridimensionales a través de un filtro, algo parecido a una rejilla a escala



ELECTROIMÁN utilizado en 1845 por Michael Faraday (1791-1867) para demostrar el efecto que llevaría su nombre.





diminuta, que las elimina a todas menos a una, que, ahora sí, es plana; precisamente la que dibujamos sobre el papel.

La luz emergente está polarizada porque vibra solo en un plano, de forma que, si atraviesa luego un segundo filtro polarizador, idéntico al primero pero que hemos rotado 90º, es totalmente absorbida. Si entonces ponemos entre los polarizadores un medio óptico que tenga algún efecto rotatorio sobre el plano de polarización, es decir, que interaccione con la luz, una pequeña cantidad conseguirá atravesar el último filtro y detectaremos la salida de un poco de luz. A las sustancias que modifican el plano de polarización las llamamos birrefringentes.

La luz polarizada y los inherentes filtros birrefringentes son herramientas de primer orden en la investigación física, ya que pueden poner de manifiesto distintos fenómenos. Se aplican a la observación de fluctuaciones de temperatura, del índice de refracción, de solutos en disolución, de tensiones internas y, naturalmente, de campos magnéticos, por citar solo unos pocos ejemplos. Para esto último pueden utilizarse medios no obligatoriamente birrefringentes, pero sí aquellos que, por su estructura química, sean sensibles a los campos magnéticos. Expliquémonos un poco más e invoquemos, como casi siempre que hablamos de interacciones magnéticas, a otro extraordinario científico: Hendrik Antoon Lorentz.

Según los estudios de Lorentz sobre la interacción entre el campo magnético y las partículas dotadas de carga eléctrica —y simplificando extraordinariamente—, los electrones de una sustancia se encargan de la emisión de las ondas luminosas. Dado que los electrones de un material son cargas eléctricas en movimiento, ante la presencia de un campo magnético externo reorientan su órbita y, por tanto, reemiten fotones con una orientación ligeramente distinta. En resumen, la presencia de un campo magnético sobre un material óptico adecuado hace girar el plano de polarización de la luz que lo atraviesa.

Naturalmente, todo esto puede cuantificarse. Para empezar, el efecto será mayor cuanto más intenso sea el campo magnético. También será mayor cuanto más larga sea la muestra de material óptico. Por fin, cada material posee un valor propio de desviación, una magnetorefringencia característica llamada constante de Verdet.

Además de estos aspectos principales, debemos tener en cuenta que el fenómeno que intentaremos observar puede verse alterado por numerosos problemas experimentales: el campo magnético casi nunca es homogéneo, la temperatura influye, la estabilidad de la fuente de iluminación debe ser buena y, finalmente, la medición del ángulo que rota el plano de polarización al someter el medio óptico al campo magnético es delicada —más adelante aclararemos este punto.

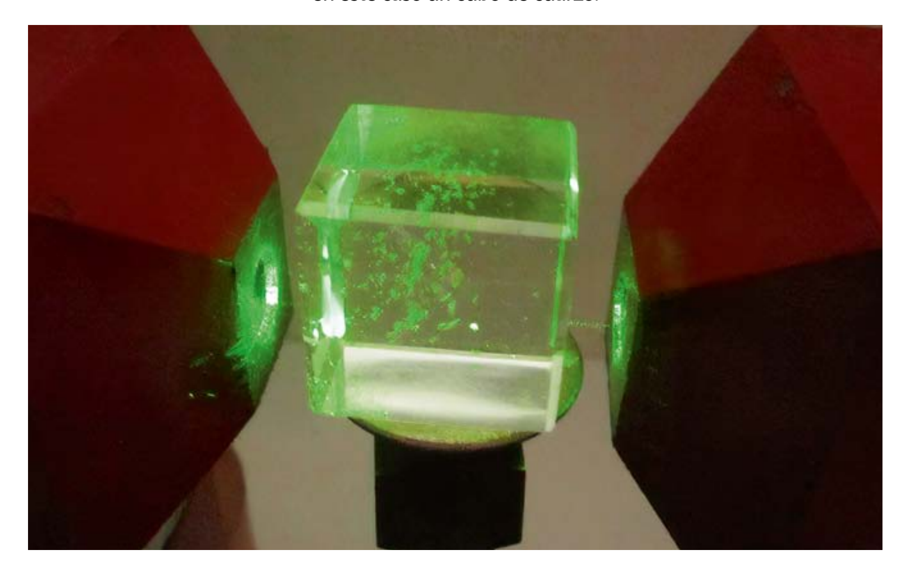
Miremos ahora la foto del instrumento. Observamos que, en lo fundamental, se trata de un simple banco óptico sobre el que instalamos la fuente de luz, luego el imán de herradura que ya describimos en una anterior colaboración [*véase* «Superimanes permanentes», por Marc Boada; Investigación y Ciencia, septiembre de 2018] y, finalmente, un sistema de observación que consiste en un filtro polarizador que puede girar sobre sí mismo junto con un fotómetro —luego explicaremos por qué—. Fijémonos ahora en los detalles del dispositivo.

Como hemos dicho, la fuente luminosa debe ser estable y de luz polarizada. Por cuestiones de practicidad, lo ideal es utilizar un puntero láser en vez de una fuente extensa, como sería una lámpara de ledes. El láser facilita enormemente la alineación de todas las piezas. Basta quemar un poco de incienso en las proximidades del aparato para ver el rayo y poder así conseguir un colimado geométrico de primera. Obsérvese que el haz atraviesa el imán gracias a unos agujeros practicados en las zapatas polares. El láser debe atravesar limpiamente los taladros por su eje geométrico para llegar, sin reflejos ni desviaciones, hasta el último filtro polarizador, llamado analizador. Por tanto, con un fino pincel que no tenga partes de hierro, pintaremos de negro mate el interior de los agujeros.

La estabilidad en la potencia de la emisión de luz se consigue alimentando el láser no con sus pilas originales, sino con una fuente de alimentación estabilizada. Para ello puede utilizarse un puntero rojo



VISTA GENERAL del instrumento y detalle de una muestra en observación, en este caso un cubo de cuarzo.



MARC BOADA

o verde y, aunque el experimentador atento deberá tener en cuenta que la longitud de onda afecta al resultado, podemos por ahora prescindir de ese detalle y explicar que recortaremos el cuerpo del puntero para soldar los extremos de unos cables de cobre a los terminales del portapilas, que conectaremos a una fuente de alimentación que suministrará el mismo voltaje que las pilas que usaba nuestro puntero láser.

La mayoría de estos artefactos portan de serie una rosca en su extremo de salida. Sirve para fijar filtros que producen efectos más o menos espectaculares. Aprovecharemos esta ventaja para recortar un disco de filtro polarizador que encaje en ese espacio. ¿De dónde podemos sacarlo? En primer lugar, visitaremos una tienda de material fotográfico; allí suelen tener filtros polarizadores para cámaras fotográficas. Otra alternativa pasa por localizar unas gafas de cine en 3D y canibalizar uno de sus filtros. Como última opción, podemos retirar el filtro polarizador, perfectamente adherido, que hay en todas las pantallas planas de teléfono móvil. En este caso, abriremos con destornilladores diminutos el aparato —casi todos tenemos alguno olvidado en un cajón—, para sacar los distintos componentes (que luego llevaremos a un punto de reciclaje) y, finalmente, acceder a la pantalla, de la que despegaremos el filtro con un cúter. Los residuos de adhesivo pueden eliminarse con algo de alcohol.

Lo primero que podemos hacer es una prueba exploratoria. Cortemos el disco de filtro polarizador (normalmente muy pequeño). Antes de colocarlo en la boca del láser, lo podemos superponer al resto de filtro que nos queda y mirar a su través. Girando uno con respecto al otro, observaremos estupefactos que, súbitamente, deja de pasar luz. Esa es la posición de extinción en la que deberemos colocar los filtros al final.

Pasemos ahora al imán y miremos de nuevo el dibujo del montaje. La separación entre las zapatas polares es de 40 milímetros, con un campo magnético en el centro de 1700 gauss y junto a las zapatas de casi 3000 gauss. En su centro se sitúa una pequeña ménsula donde colocaremos el material que queremos testar. La columna que la soporta se fija al eje de rotación, ya que el imán debe girar sobre sí mismo para adoptar dos posiciones: una, alineada, como aparece en la foto, con el láser pasando por el interior de las zapatas polares; la otra, perpendicular a la primera, de forma que el campo magnético sea transversal a la muestra y al rayo de luz. Obviamente, el imán tiene un taladro en el centro de su base por donde pasa ese eje, que, a su vez, está atornillado a un banco óptico sólido y estable.

Nos falta todavía un último subconjunto: el sistema de detección del giro del ángulo de polarización. Para materializarlo, recortaremos otro disco de filtro polarizador, que montaremos sobre un disco graduado, un transportador de ángulos, por ejemplo. Lo importante es que pueda girar sobre sí mismo, de forma que podamos colocarlo totalmente ortogonal respecto del polarizador del láser y extinguir toda la luz posible. ¿Cómo podemos saber si la luz se ha extinguido? Faraday lo hizo simplemente a ojo: giró poco a poco el analizador hasta que observó un mínimo de luz. Nosotros conjuraremos el peligro que supone mirar hacia un haz láser colocando detrás un fotómetro (con un poco de suerte, lo encontraremos a un precio irrisorio en tiendas de segunda mano; si no, podemos comprarlo, también muy barato, en cualquier tienda en línea).

Finalmente, obsérvese que tanto la ménsula portamuestras como el propio láser, el analizador y el fotómetro disponen de un estator que permite regular la altura y la orientación, de forma que todos quedan perfectamente alineados.

Ya estamos listos para una primera puesta en marcha de nuestro montaje experimental. Conectemos el láser. Esperaremos unos minutos mientras su temperatura (y, por tanto, su potencia)

aumenta y se estabiliza. Comprobaremos que, girando el imán, el haz permanece quieto y que las lecturas del fotómetro no varían de forma significativa (quizá debamos trabajar casi a oscuras para no alterar estas lecturas).

Pongamos ahora una muestra en la ménsula. Hasta aquí habíamos dicho bien poco sobre las muestras. Nuestro ilustre antecesor descubrió que el vidrio al plomo, el cuarzo y también, aunque en menor medida, el agua presentaban un efecto observable. Por tanto, pasaremos a proveernos de todo tipo de muestras transparentes. En tiendas de minerales o de artículos esotéricos localizaremos dados de cuarzo, perlas y esferas de cristal al plomo, cristales transparentes variados que someteremos a la acción de nuestro imán. También podemos construir una pequeña cubeta donde ensayaremos con distintos líquidos: agua, aceite de oliva, sulfuro de carbono o disoluciones más o menos concentradas de distintas sales, como el cloruro de hierro.

Primero mediremos la intensidad de radiación luminosa con el fotómetro y sin el elemento óptico que queremos testar. Luego, colocaremos el elemento óptico (por ejemplo, una esfera de cristal o un cristal de cuarzo). Mediremos la cantidad de luz cuando el imán está alineado y cuando se halla ortogonal. Sorprendentemente, las lecturas varían solo algún tanto por ciento, pero lo hacen de forma sistemática. Estamos observando el efecto Faraday.

A esta primera prueba simplemente observacional pueden seguir otras mucho más interesantes. Si cuando tenemos el imán alineado y, por tanto, las lecturas en el fotómetro son máximas, giramos el analizador hasta reducir la luz al mínimo, el valor obtenido en la lectura del círculo graduado nos permitirá hacer un cálculo aproximado de la constante de Verdet de la muestra analizada. Esta constante viene dada esencialmente por el cociente entre el ángulo girado y el producto del campo magnético y el espesor de la muestra. En general es una constante que depende fuertemente de la longitud de onda de la luz. Las características del efecto Faraday lo convierten en una herramienta importante en astronomía, donde se usa, por ejemplo, para medir campos magnéticos de púlsares.

La sutil interacción que subyace bajo el efecto Faraday nos brinda, por tanto, una maravillosa oportunidad para adentrarnos en la física experimental y rememorar uno de los experimentos más importantes de la historia de la ciencia.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Hahn y Meitner en la Alemania nazi

Relaciones personales y políticas tras el descubrimiento de la fisión del uranio

José Manuel Sánchez Ron

Los hallazgos científicos no solo nos permiten entender mejor qué existe en la naturaleza (la terrestre y la cósmica) y cómo se comportan los objetos y fenómenos que se dan en ella, sino que también afectan a nuestras vidas de innumerables maneras, unas más aparentes que otras. El descubrimiento de la fisión del uranio a finales de 1938 es uno de esos en los que esas consecuencias se hicieron manifiestas de manera particularmente notoria.

Los hechos puramente científicos se pueden resumir con facilidad. Dentro de un programa de investigación establecido desde hacía años, a finales de 1938 el químico nuclear Otto Hahn (1879-1968) realizó una serie de experimentos con su colaborador Fritz Strassmann (1902-1980) en el Instituto de Química de la Asociación Káiser Guillermo en Dahlem, en las cercanías de Berlín. El procedimiento que utilizaron se basaba en bombardear con neutrones lentos el uranio. Para su sorpresa, observaron que obtenían bario (número atómico 56), un elemento mucho más ligero que el uranio (número atómico 92). Parecía que el núcleo de uranio se había partido en dos; que se había fisionado. Pero jamás se había observado algo parecido. Las transmutaciones atómicas descubiertas hasta entonces involucraban transformaciones de un elemento en otro cercano a él en la tabla periódica. El 6 de enero de 1939 publicaban el correspondiente artículo en el que manifestaban dudas ante sus «peculiares resultados [...] Como químicos, debemos afirmar que los nuevos productos corresponden a bario [...] Sin embargo, como químicos nucleares, que trabajan muy próximos al campo de la física, no podemos decidirnos a dar un paso tan drástico que va en contra de todos los experimentos realizados anteriormente en la física nuclear. Acaso se hayan dado una serie de coincidencias poco habituales que nos han proporcionado indicaciones falsas».

Strassmann sustituía a Lise Meitner (1878-1968), quien durante treinta años había compartido, en pie de igualdad, la investigación con Hahn, pero que como austríaca de origen judío había tenido que abandonar Alemania tras la anexión de Austria, el *Anschluss*, en marzo de 1938. Fue, por consiguiente, debido a una circunstancia política por lo que Meitner no compartió con Hahn el mérito del descubrimiento de la fisión del uranio.

La explicación teórica de la fisión

Al abandonar Alemania, Meitner se instaló en Suecia. Encontró acomodo profesional en Estocolmo, en el instituto dirigido por Manne Siegbahn, que había recibido en 1924 el Nobel de física por «sus descubrimientos e investigación en el campo de la espectroscopía de rayos X». Cuando Meitner recibió en su exilio, a través de una carta de Hahn, la noticia del descubrimiento de la fisión del uranio, se encontraba pasando las vacaciones de Navidad en Kungälv (cerca de Gotemburgo) junto a su sobrino, también físico, también exiliado forzoso, Otto R. Frisch (1904-1979), entonces en el Instituto de Física dirigido por Niels Bohr en Copenhague. Utilizando una idea que George Gamow había sugerido años atrás y que Niels Bohr había desarrollado, la de que el núcleo podía ser como una gota líquida, comprobaron que la carga eléctrica del núcleo de uranio era suficiente para superar casi por completo el efecto de la tensión superficial (que se opone a que una gota se divida), de manera que el núcleo se hacía inestable, listo para dividirse a la menor provocación, como podría ser el impacto de un solo neutrón. Y con la ayuda de la fórmula einsteiniana $E = mc^2$ pudieron explicar otros detalles, llegando a la conclusión de que eran capaces de entender el fenómeno descubierto por Hahn y Strassmann, ¡y todo antes de que se hubiese publicado el artículo de estos!



OTTO HAHN Y LISE MEITNER en el laboratorio en el que entonces, 1909, investigaban, del Instituto de Química de Berlín, dirigido por Emil Fischer.

Poco después, Frisch regresó a Copenhague, donde informó a Bohr, que estaba a punto de embarcar rumbo a Estados Unidos para pasar tres meses en la Universidad de Princeton. Con él iban su hijo Erik y su estrecho colaborador Léon Rosenfeld. El 16 de enero, el barco llegaba a Nueva York, donde le esperaban John Wheeler y Enrico y Laura Fermi. Nada más desembarcar, Bohr dijo unas palabras a Wheeler sobre las noticias que Frisch le había traído. Niels y Erik se fueron entonces con los Fermi para una breve estancia en Nueva York, antes de trasladarse a Princeton, a donde Wheeler llevó a Rosenfeld. En el camino, Wheeler convenció a este para que diese una charla en Princeton sobre el descubrimiento de Hahn y Strassmann, la interpretación de Meitner y Frisch, y la conclusión, que Bohr había desarrollado con Rosenfeld durante la travesía, de que el nuevo proceso encajaba de manera natural con la teoría del núcleo compuesto de las reacciones nucleares. La descripción de Rosenfeld causó una gran excitación, y malestar a Bohr cuando supo de ella, ya que quería proteger el trabajo de Meitner y Frisch hasta que fuese publicado (lo sería el 11 de febrero).

Entre los mecanismos que utilizaron los físicos estadounidenses para difundir la noticia no faltaron las cartas. El 28 de enero, Robert Oppenheimer, entonces profesor en Berkeley y futuro líder del Proyecto Manhattan, escribía a William A. Fowler, uno de sus discípulos en el Instituto de Tecnología de California, donde Oppenheimer pasaba la mitad del año: «El asunto del U [uranio] es increíble. Nos enteramos de él en primer lugar por los periódicos, telegrafiamos pidiendo más información y hemos recibido muchos informes desde entonces. Ya sabes que comenzó con el hallazgo de Hahn de que lo que había tomado por Ra [radio] en una de las actividades del U resultó ser Ba [bario] [...] Muchos puntos están todavía oscuros [...] ¿de cuántas maneras se rompe el U? ¿Aleatoriamente, como se podría esperar, o solamente de ciertas maneras? Y, lo más importante de todo, ¿se emiten muchos neutrones de la ruptura o de las piezas resultantes?».

Ese último punto era esencial, ya que si en la fisión del uranio se producía más de un neutrón, entonces era imaginable pensar que se podía desatar una reacción en cadena (los neutrones liberados podían colisionar con otros núcleos de uranio, liberando en cada caso energía y neutrones, y así sucesivamente). Pronto se abordó la cuestión: en París, Frédéric Joliot-Curie obtuvo el valor medio de 3,5, mientras que, en la Universidad de Columbia, Fermi contabilizaba 2 neutrones.

Meitner, Hahn y la Alemania de Hitler

Pero el caso del descubrimiento de la fisión del uranio no se limita a la dimensión científica. También lleva asociadas otras de índole personal y política, relativas a las relaciones que Meitner y Hahn mantuvieron entre sí y con la Alemania nazi. Y lo primero que hay que señalar es que Meitner no siempre vio el nuevo régimen con los ojos con los que terminó contemplándolo. Resulta ilustrativa, en este sentido, la carta que escribió a Hahn (entonces invitado en la Universidad de Cornell) el 21 de marzo de 1933, esto es, poco después de que Hitler se hiciera con el poder:

Querido Otto Hahn,
Ayer llegó tu primera carta del 10 de este mes y un par de días después la que enviaste desde Nueva York. Gracias cordiales por ambas. Me alegra que en conjunto te sientas a gusto en América [...]

Aquí, naturalmente, todos y todo se ve afectado por los radicales cambios políticos. Hoy es la ceremonia de inauguración del Reichstag *en Potsdam. La semana pasada ya recibimos instrucciones de la Asociación Káiser Guillermo para poner la bandera esvástica al lado de la negra-blanca-roja bandera imperial. La Asociación Káiser Guillermo cubre el coste de las banderas.*

La esposa del canciller privado Schiemann y Edith [Hahn, la esposa de Otto] estuvieron aquí para escuchar la emisión de radio de la ceremonia de Potsdam. Todo fue amigable y digno. Hindenburg dijo unas pocas frases y después dejó que hablase Hitler, que profirió con mucha moderación, tacto y de manera personal. Probablemente, las cosas continuarán así. Si la sensatez puede prevalecer entre los líderes, entre los que hay que contar sobre todo con [Franz von] Papen [el político que ayudó a que el presidente Hindenburg nombrase a Hitler canciller], entonces existe la esperanza de que todo termine bien al final. Los períodos de transición casi inevitablemente producen, por supuesto, todo tipo de torpezas. Todo depende ahora de la moderación racional.

Seguramente ha sido difícil para Haber tener que izar la bandera esvástica. Me alegró enterarme por casualidad de que él personalmente encargara a Kühn [el superintendente del edificio] que se ocupase de lo referente a izar la nueva bandera.

El ejemplo de Fritz Haber

Fritz Haber, el gran químico-físico, dirigía el instituto en el que investigaban Hahn y Meitner. Y sí, debió de ser doloroso para él, ferviente patriota alemán, que la bandera germana tradicional tuviera que compartir protagonismo con la esvástica. Haber, recordemos, había sido el promotor de que Alemania utilizase gases asfixiantes en la Primera Guerra Mundial; asimismo, el proceso Haber-Bosch para la síntesis del amoníaco aseguró a Alemania la producción de explosivos, municiones y abonos durante la contienda.

Haber era de origen judío, pero podía acogerse a una de las excepciones previstas por la ley del 7 de abril de 1933 por la que se apartaba de sus puestos a todos los funcionarios que no fueran de origen ario. La excepción en cuestión se aplicaba «a aquellos funcionarios que lo fuesen el 1 de agosto de 1914, o que hubiesen luchado en el frente defendiendo al Imperio Alemán o a sus aliados durante la [Primera] Guerra [Mundial], o cuyos padres o hijos hubiesen caído en la Guerra». Pero Haber no quiso utilizar esa posibilidad y el 30 de abril envió una carta al ministro para la Ciencia, Arte y Educación, en la que le solicitaba su jubilación, con fecha del 1 de octubre de 1933, de su puesto de director del instituto, así como de su cátedra en la Universidad de Berlín. «Mi decisión de pedir la jubilación», escribía, «ha surgido del contraste entre la tradición investigadora en la que he vivido hasta ahora y los puntos de vista diferentes que usted, Sr. Ministro, y su Ministerio defienden como protagonistas del actual gran movimiento nacional. En mi puesto científico, mi tradición exige que al escoger mis colaboradores tenga en cuenta solamente las credenciales profesionales y personales de los solicitantes, independientemente de sus ascendientes raciales».

Tras abandonar sus puestos, Haber se trasladó a Inglaterra, invitado por la Universidad de Cambridge. Aparentemente, ni el ambiente ni el clima ayudaron a levantar su estado anímico y energías. Falleció el 30 de enero de 1934, cuando se dirigía a Basilea para pasar unas vacaciones.

La carta de Meitner a Hahn

Hahn permaneció en la Alemania nazi, participando de hecho en el poco exitoso proyecto atómico germano. En 1945 recibió el premio Nobel de química correspondiente a 1944 por, según especificaba la comunicación oficial de la Academia sueca, «el descubrimiento de la fisión de núcleos pesados». Meitner nunca recibió semejante galardón. El 27 de julio de 1945, esto es, tras la derrota alemana, Meitner escribía la siguiente carta a Hahn:

Querido Otto,
Tu última carta está fechada el 25 de marzo. Puedes imaginar lo ansiosa que estaba de recibir noticias de todos vosotros. He seguido constantemente los acontecimientos a través de los informes de guerra de la prensa inglesa, y creo poder suponer que la zona en la que estáis tú y tu familia y [Max von] Laue fue ocupada sin ninguna lucha. Por consiguiente, deseo con todo mi corazón que ninguno de vosotros haya sufrido personalmente. Naturalmente, será muy difícil para ti ahora, pero esto es inevitable, por supuesto. Por otra parte, estoy muy preocupada por los Planck, ya que en su zona se han producido terribles combates. ¿Sabes algo de ellos y de los amigos de Berlín? Un americano te llevará esta carta. La recogerá pronto, de manera que estoy escribiendo apresuradamente; y sin embargo, tengo tanto que decir cercano a mi corazón. Por favor, ten en mente esto y, por favor, lee lo que escribo con la seguridad de mi inquebrantable amistad.

Te he escrito muchas cartas mentalmente durante los últimos meses, porque estaba claro para mí que incluso personas como tú y Laue no os habéis dado cuenta de la situación real. Me he dado cuenta de ello con claridad cuando Laue me escribió con ocasión del fallecimiento de [el biólogo Fritz von] Wettstein afirmando que su muerte constituía también una pérdida en un sentido más amplio, ya que debido a su talento diplomático W[ettstein] podía haber sido muy útil al final de la guerra. ¿Cómo un hombre que nunca objetó a los crímenes de los recientes años puede ser útil a Alemania? Esta es, por supuesto, la desgracia de Alemania; el hecho que todos vosotros habéis perdido la noción de la justicia y de lo correcto. Tú mismo me dijiste en marzo de 1938 que [el químico especializado en la química aplicada a la medicina Philipp H.] Hörlein te había dicho que se estaban haciendo cosas terribles con los judíos. De manera que él sabía de todos los crímenes que se habían planeado y después ejecutado, y a pesar de ello era miembro del Partido. Y tú mismo lo considerabas una persona muy decente —también a pesar de ello— y permitías que influyese en ti con relación a tu comportamiento con tu mejor amigo [seguramente se refería a ella misma].

Todos vosotros también habéis trabajado para la Alemania nazi y nunca habéis intentado una resistencia pasiva. Ciertamente, para engañar a vuestras conciencias de vez en cuando habéis ayudado a alguna persona que lo necesitaba, pero habéis permitido que millones de personas inocentes fuesen exterminadas sin efectuar la menor protesta.

Tengo que escribirte esto, por tu propio beneficio y por el de Alemania, que depende totalmente de que comprendáis lo que habéis permitido que suceda. Aquí, en la neutral Suecia, mucho antes del final de la guerra se ha discutido acerca de lo que debería hacerse con los intelectuales alemanes una vez que finalizase la guerra. ¿Qué es lo que pensarán sobre el particular los ingleses y americanos? Yo y también muchos otros piensan que una solución para ti sería que realizases una declaración pública manifestando que eres consciente de que con tu pasividad has adquirido una responsabilidad compartida por lo que ha sucedido y que sientes la necesidad de ayudar a corregirlo, en la medida en que sea posible con algo que ya ha tenido lugar. Pero muchos piensan que es demasiado tarde para esto. Estas personas dicen que has traicionado primero a tus amigos, después a tus compañeros e hijos permitiendo que pusieran en peligro sus vidas en una guerra criminal, y finalmente que también has traicionado a Alemania, porque ni siquiera luchaste contra la absurda destrucción de Alemania cuando ya no existía ninguna esperanza en la guerra.

Esto suena inmisericorde y, no obstante, créeme, es debido a la verdadera amistad por lo que te escribo esto. No puedes realmente esperar que el resto del mundo tenga piedad de Alemania. Las inconcebibles atrocidades en los campos de concentración de las que se ha informado estos días sobrepasan todo lo que habíamos temido. Cuando escucho en la radio inglesa los muy realistas informes de ingleses y americanos sobre [Bergen]-Belsen y Buchenwald, comienzo a llorar y no puedo dormir en toda la noche. Deberías haber visto a las personas que llegan aquí procedentes de estos campos. Alguien debería obligar a hombres como Heisenberg y a muchos otros millones a que vean estos campos y a las personas martirizadas allí. Su aparición [de Heisenberg] en Dinamarca en 1941 no se puede olvidar.

Puede que recuerdes que mientras que yo estaba todavía en Alemania —y hoy me doy cuenta de que no solo fue estúpido sino muy injusto por mi parte no haberme ido inmediatamente— a menudo te decía: las cosas no irán mejor en Alemania mientras que solamente seamos nosotros los que pasemos noches sin dormir y no ocurra esto con todos. Pero tú no pasabas ninguna noche sin dormir. No querías ver; era demasiado molesto. Podría demostrártelo con muchos ejemplos, pequeños y grandes. Por favor, créeme que todo lo que he escrito aquí es un intento de ayudaros a todos.

Con saludos muy afectuosos para todos. Tuya,

Lise.

La amistad que Meitner sentía por Hahn no impidió que le juzgase. Se puede perdonar, pero no olvidar. Hahn, por cierto, nunca realizó la declaración que Meitner le pidió.

PARA SABER MÁS

From my life. Richard Willstätter. W. A. Benjamin, Nueva York 1965.
Robert Oppenheimer. Letters and recollections. Dirigido por Alice K. Smith y Charles Weiner. Harvard University Press, Cambridge, 1980.
Physics and national socialism. An anthology of primary sources. Dirigido por Klaus Hentschel. Birkhäuser, Basilea 1996.

EN NUESTRO ARCHIVO

Lise Meitner y el descubrimiento de la fisión nuclear. Ruth Lewin Sime en *IyC*, marzo de 1998.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa fue reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.



El duelo de los matemáticos Thue y Morse

Las sorprendentes propiedades de una sucesión binaria que ha aparecido en contextos tan dispares como la teoría de números, la topología o incluso el ajedrez



Esta madrugada los matemáticos Thue y Morse van a batirse en duelo. Sus padrinos, los también matemáticos Prouhet y Euwe, no han podido hacerlos desistir. De nada ha servido que Prouhet, con unas copas de más, los llamara «duelistas a lo Galois» o que Euwe, con aún más copas encima, les dijera que fallaban más que una escopeta de feria. De modo que, como padrinos, se vieron obligados a decidir las reglas del duelo.

Tras determinar que ambos tenían la misma patética probabilidad $p \ll 1$ de atinar, decidieron que el primero en disparar sería elegido al azar y que, a partir de ahí, se turnarían hasta que alguno acertara al contrincante.

Thue y Morse están ya armados y espalda contra espalda. Prouhet anuncia solemnemente el duelo y Euwe comienza la cuenta de pasos. Treinta zancadas después, ambos duelistas se giran y Thue —así lo ha querido el azar— apunta para llevar a cabo su primer intento. Entonces Prouhet, a quien se le está pasando la borrachera y comienza a sospechar que la cosa puede acabar mal, dice:

—¡Un momento! Tal vez la norma que hemos acordado no sea tan justa.

—Desde luego no para nosotros —responde socarronamente Euwe—, porque esto va a durar una eternidad... si es que antes no nos pegan un tiro a nosotros.

—Explícate rápido —le espeta nervioso Thue—, que este pistolón pesa horrores.

—Si cuando tú disparas escribimos un 0 y cuando lo hace Morse un 1, la secuencia 0101010101... codifica la regla que hemos pactado —comienza Prouhet—. Supongamos, sin pérdida de generalidad, puesto que ambos tenéis la misma probabilidad p de acertar, que empiezas tú, como de hecho está ocurriendo. ¿Qué probabilidad de sobrevivir tienes?

—La probabilidad que nos pides es la suma de todas las probabilidades de que el duelo acabe con un acierto de 0 —interviene Morse, que parece haberse olvidado de que Thue le apunta a la cabeza con un pistolón.

—¡Exacto! —prosigue animado Prouhet—. El duelista 0 acertará el primer disparo con probabilidad p. Para vencer en el tercero, 0 debe fallar el primero, 1 fallar el segundo y 0 acertar el siguiente, algo que sucederá con probabilidad $(1 - p)^2p$...

Disparo	Duelista	P_0	P_1
1.º	0	0,3333	0,0000
2.º	1	0,3333	0,2222
3.º	1	0,3333	0,3704
4.º	0	0,4321	0,3704
5.º	1	0,4321	0,4362
6.º	0	0,4760	0,4362
7.º	1	0,4760	0,4655
8.º	1	0,4760	0,4850
9.º	0	0,4890	0,4850
10.º	1	0,4890	0,4937

DUELO JUSTO: Dos duelistas, 0 y 1, disparan por turnos. La sucesión de la segunda columna es la que se obtiene si la probabilidad que tiene cada uno de acertar un disparo es $p = 1/3$ y si, tras cada ronda, se deja disparar a aquel cuya probabilidad acumulada de vencer (P_0 o P_1, respectivamente) es menor. (El primer turno, 0, se decide por sorteo.) Cuando $p \to 0$, la secuencia converge hacia la sucesión de Thue-Morse.

Euwe, que de repente ve la posibilidad de volver al bar, dice:

—Hay algo más. Una cosa es que al final de la secuencia infinita ambos tengan la misma probabilidad de ganar, y otra que el duelo haya sido lo más justo posible en cada momento... No parece fácil de resolver, así que, ¿por qué no regresamos al bar y resolvemos el duelo con una partida de ajedrez?

—Espera —dice Thue— se me ocurre que podemos encontrar la solución justa para cualquier valor de p.

—¿Cómo? —dicen al unísono los otros tres.

—Impartamos justicia sobre la marcha. Compensemos en cada disparo la diferencia en la probabilidad de vencer cediendo el turno a quien esté en desventaja. La dinámica sería la siguiente. En el primer turno, el duelista 0 dispara y vence con probabilidad p. Puesto que en ese momento 1 no dispara, su probabilidad de ganar es nula. Así que lo compensaremos dejándole disparar en el segundo turno. Como en esa ronda el duelista 0 no disparará, su probabilidad de vencer seguirá siendo la misma que antes; es decir, p. Sin embargo, para que 1 acierte el segundo disparo, 0 habrá tenido que fallar el primero, por lo que su probabilidad de vencer será $(1 - p)p$.

—¿Quién realizará entonces el tercer disparo? —pregunta Euwe resignado.

—Si $(1 - p)p$ fuese mayor que p, para compensar la ventaja de 1 cederíamos el turno a 0. Sin embargo, como $(1 - p)p$ siempre será menor que p, continuará disparando el duelista 1. Así que los tres primeros términos de la secuencia serán siempre 011.

—Espera —interpela Euwe arrebatándole la pistola a Morse—. Deja que ponga un ejemplo.

Y, escribiendo en el suelo con la pistola, va razonando en voz alta:

—Por ejemplo, si $p = 1/3$, entonces 0 vencería en el primer disparo con probabilidad 1/3. En ese momento 1 tiene una probabilidad nula de ganar, así que, para compensarlo, ahora disparará él. Vencerá con probabilidad $(1 - 1/3)(1/3) = 2/9$. Esa cifra sigue siendo menor que 1/3, por lo que volveremos a dar el turno a 1. De modo que, como decías, la serie comienza con 011. Ahora, para que 1 venza en el tercer disparo, debe sobrevivir al tiro inicial de 0, fallar el segundo y acertar el tercero. Así que la probabilidad total de que 1 gane tras el tercer disparo viene dada por $(1 - 1/3)(1/3) + (1 - 1/3)^2(1/3) \approx 0{,}3704$. Como ahora esta probabilidad sí es mayor que 1/3, cederemos el turno a 0.

En ese momento, Thue saca unas hojas y unos lápices y entre todos rellenan la tabla correspondiente (*véase la tabla superior*).

—Así que, con este argumento, podemos generar la secuencia de disparos justa, que en el caso de $p = 1/3$ sería 0110101101... —concluye Thue.

—De modo que cada valor de p da lugar a su propia secuencia. Si p fuese 1/2 en vez de 1/3, por ejemplo, el cuarto disparo volvería a ser para 1. Así que, para determinar la secuencia de disparos correcta, solo tenemos que concretar cuánto vale la probabilidad p en este caso —sentencia Prouhet—. ¡Señores, vayan disparando al tronco de aquel árbol!

Varios cientos de disparos fallidos después, los cuatro matemáticos ya habían encontrado la solución general y, en vista de la nefasta puntería de los contendientes, decidieron determinar la secuencia haciendo que la probabilidad p tendiera a cero. La secuencia resultante resultó ser 0110100110010110..., que hoy conocemos como secuencia de Thue-Morse. Una sucesión célebre por varias razones.

Sucesión ubicua

En realidad, la demostración de que, cuando $p \to 0$, la secuencia de turnos justa converge a la sucesión de Thue-Morse (secuencia A010060 en la Enciclopedia en Línea de Sucesiones de Enteros, oeis.org) es un resultado reciente de los matemáticos Joshua Cooper y Aaron Dutle. Se trata de un ejemplo más de la omnipresencia de esta secuencia binaria. La demostración es sencilla, aunque demasiado larga para esta columna.

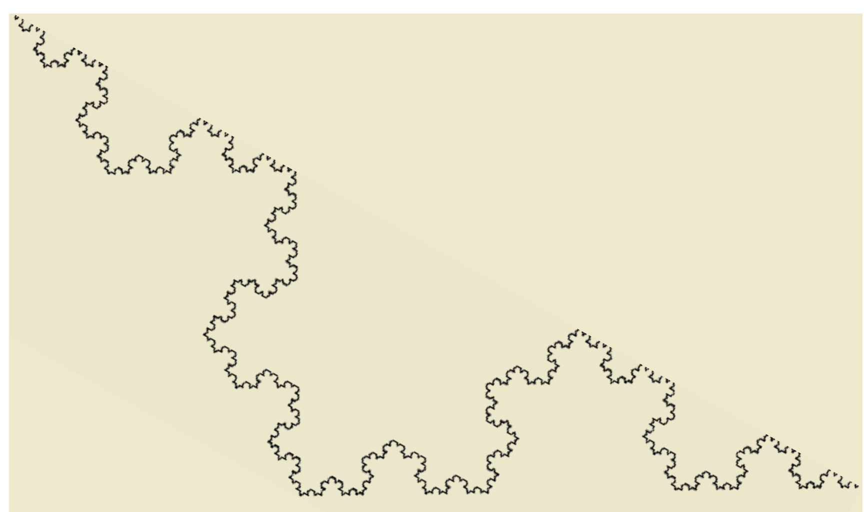
Una forma clásica de generar la sucesión es comenzando con el 0 y aplicando la regla de sustitución $0 \to 01$ y $1 \to 10$, donde cada dígito se reemplaza por otros dos: él mismo y su complementario. De esta manera obtenemos 0, 01, 0110, 01101001, 0110100110010110...

La primera noticia que tenemos de esta sucesión se remonta a 1851, cuando el matemático francés Eugène Prouhet la usó para resolver un problema en teoría de números que hoy se conoce como

0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1,
0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0,
0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1,...

LA SUCESIÓN BINARIA DE THUE-MORSE, de la que aquí se muestran los primeros 60 términos, presenta varias propiedades únicas. Entre ellas cabe destacar su estructura «fractal» (permanece invariante al eliminar los términos en posición par, *blanco*) o el hecho de que se trate de una sucesión aperiódica sin tres elementos consecutivos iguales.





SUCESIÓN FRACTAL: Un trabajo de 2005 demostró que la célebre curva fractal de Koch (*imagen*) puede obtenerse al interpretar los términos de la sucesión de Thue-Morse como comandos en el lenguaje de programación Logo.

problema de Prouhet-Tarry-Escott. En 1906, el matemático noruego Axel Thue la redescubrió buscando un ejemplo de secuencia de símbolos aperiódica y que pudiera calcularse de manera recursiva. Y en 1921 hizo lo propio el estadounidense Marston Morse en el contexto de la geometría diferencial y la dinámica simbólica. Vista la ubicuidad de una serie que aparece en ámbitos tan diferentes como la teoría de números, la combinatoria, el álgebra, la topología o incluso la física, la sucesión ha debido ser redescubierta de manera independiente un buen número de veces.

Propiedades fractales

Existen muchas formas de generar la secuencia de Thue-Morse. Por ejemplo, expresando los números naturales en binario (0, 1, 10, 11, 100, 101, 110, 111...) y tomando sus «raíces digitales», la suma de sus dígitos módulo 2. Y una de las propiedades más sorprendentes de la secuencia es su autosemejanza: si eliminamos los términos de las posiciones pares, ¡la sucesión permanece inalterada! Una sorpresa que puede deducirse de la inversa de su regla generadora: 01 → 0; 10 → 1.

Otra curiosa propiedad es que se trata de una sucesión aperiódica, aunque su generación es claramente determinista, y sin más de dos términos consecutivos iguales, cuestión en la que estaba interesado Thue y a la que, en 1929, llegó independientemente el matemático neerlandés Max Euwe. Euwe, que también fue campeón del mundo de ajedrez, la aplicó para determinar si cierta regla para declarar tablas que estaba vigente en aquella época hacía que el juego fuera finito. El lector interesado puede encontrar los detalles de esta historia en el excelente artículo de Francisco Balibrea que aparece en la bibliografía.

Espero haber levantado, querido lector, su curiosidad por esta extraordinaria sucesión. Y para asegurarme de ello, me gustaría acabar con otro resultado reciente, este debido a los matemáticos Jun Ma y Judy Holdener, que revela la naturaleza fractal de esta famosa secuencia. ¿Recuerdan los gráficos de tortuga que utilizamos en la columna del mes pasado dedicada a los sistemas L? Ma y Holdener decidieron interpretar los símbolos de la sucesión de Thue-Morse como comandos de Logo, asignando al 0 un movimiento de avance y al 1 una rotación de 60 grados en sentido antihorario. Pueden apreciar el resultado en la figura superior: ¡la famosa curva fractal de Koch! IyC

PARA SABER MÁS

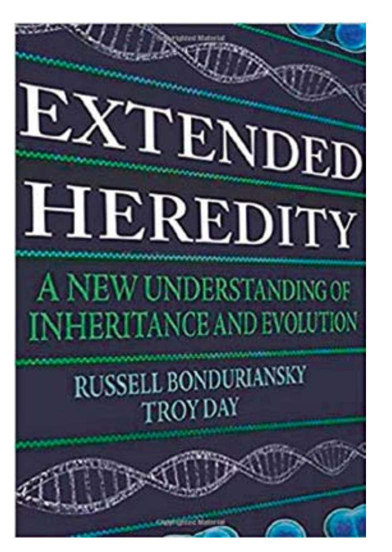
When Thue-Morse meets Koch. Jun Ma y Judy Holdener en *Fractals*, vol. 13, págs. 191-206, septiembre de 2005.

Greedy Galois games. Joshua Cooper y Aaron Dutle en *American Mathematical Monthly*, vol. 120, págs. 441-451, 2013.

Los secretos de algunas sucesiones de números enteros. Francisco Balibrea Gallego en *MATerials MATemàtics*, vol. 2016, art. n.º 2, julio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La gramática del crecimiento multicelular. Bartolo Luque en *IyC*, marzo de 2019.



EXTENDED HEREDITY
A NEW UNDERSTANDING OF INHERITANCE AND EVOLUTION

Russell Bonduriansky y Troy Day
Princeton University Press, 2018

La herencia más allá del ADN

Factores no genéticos que se transmiten de generación en generación

Entre las ciencias empíricas, la biología se caracteriza por la ausencia de leyes en sentido estricto. Por más que Francis Crick hablara del dogma central de la disciplina, el que establecía la secuencia de pasos del ADN a la síntesis proteica mediante transcripción en ARN, no hay afirmación general en su ámbito que no tenga su excepción. Los propios conceptos fundamentales resultan muy maleables. Pensemos en la noción capital de especie. Se daba por supuesto que, en los organismos superiores, no digamos ya en los primates, existía una barrera infranqueable: la reproducción cruzada entre dos especies distintas con progenie viable. Sin embargo, en el verano de 2018, la paleogenética descubrió un descendiente de la hibridación de un padre denisovano y una madre neandertal. Otro aserto que, por incuestionable, ha cristalizado en los libros de texto declara la imposibilidad de la herencia de los caracteres adquiridos. La ciencia habría refutado la tesis lamarckista y solo los genes se transmitirían de padres a hijos, de generación en generación.

El gen es un segmento de ADN, componente central de la maquinaria celular que regula los procesos fisiológicos y la respuesta del interior celular o de un organismo multicelular, desde el desarrollo juvenil hasta el estado adulto, el envejecimiento y la muerte. Para apreciar el papel único de nuestros genes, importa reseñar tres atributos cruciales del ADN. En primer lugar, la estabilidad de la molécula, como se refleja en los restos fósiles conservados en huesos o en tejidos blandos de animales desaparecidos. En segundo lugar, su estructura bicatenaria, que permite su replicación con suma fidelidad y facilitando que los genes pasen inalterados de los progenitores a la descendencia. En tercer lugar, su capacidad para almacenar cantidades ingentes de información. Tales propiedades no son igualadas por otros factores.

En el siglo XIX, August Weismann cortó el rabo de ratones y observó que tal reducción no pasaba a la descendencia: las crías nacían con el apéndice. El experimento se convirtió en canónico del rechazo de la herencia de los rasgos sobrevenidos. (Sin embargo, si hubiera eliminado el «diente» de la ameba *Difflugia corona*, habría encontrado una herencia fiable de la desfiguración. El experimento de la ameba fue realizado por Herbert Jennings en 1937, pero por entonces la investigación sobre la herencia no genética había quedado marginada.) Quedó asentada la idea de que solo los genes mediaban la transmisión de información biológica a lo largo de las generaciones y que, por tanto, aportaban la materia prima para la selección natural.

La investigación reciente ha ido multiplicando, sin embargo, los ejemplos de herencia no genética. A eso justamente está dedicado *Extended heredity*, en el que Russell Bonduriansky y Troy Day describen una herencia constituida por más de un canal de transmisión de información a través de generaciones. No es el primer libro sobre la cuestión. Abrieron surco, entre otros, los textos de Eva Jablonka y Marion Lamb *Epigenetic inheritance and evolution* (1995) y *Evolution in four dimensions* (2006).

El reconocimiento de la dimensión no genética de la herencia aporta nuevas perspectivas sobre el mecanismo de operación de la evolución. Lo mismo que los genes, los factores no genéticos hereditarios acarrean información biológica a través de las generaciones, confieren semejanza entre progenitores y descendencia e inciden en el curso de la evolución. Entre los mecanismos de herencia correspondería al ADN ser el portador primario de la información en el organismo, así como el medio principal para la transmisión de la información de padres a hijos, aunque no el único. Además de los alelos genéticos que especifican las secuencias de aminoácidos de las cadenas peptídicas y codifican instrucciones reguladoras, los organismos transmitirían factores no genéticos que especificarían la estructura celular y la polaridad, aspectos del epigenoma, la conducta y otros rasgos destacables.

Es decir, habría una herencia genética, transmisora de secuencias de ADN en el genoma nuclear que procede de padres a hijos en la concepción, y una herencia no genética, que abarca la transmisión de otros factores (epigenéticos, citoplasmáticos, estructurales, simbióticos, ambientales y conductuales) y que procede de padres a hijos en la concepción o durante el desarrollo subsiguiente. La herencia extendida abarca el conjunto de mecanismos de herencia genética y no genética.

Ese concepto extendido de herencia representa una ruptura con el pasado. Mientras que los biólogos del siglo XX contemplaban la transmisión de genes como el único mecanismo de herencia, la herencia extendida implica la existencia de múltiples mecanismos que operan en paralelo, varían en propiedades importantes (tales como la estabilidad y el potencial para la inducción por el entorno) y se encuentran representados de manera muy distinta en organismos unicelulares, plantas y animales. La herencia extendida no se limita a añadir otros canales; canales diferentes acarrean distintos tipos de información. Por ejemplo, mientras que la herencia genética implica una transmisión aleatoria de factores que usualmente no pueden ser modificados por el entorno, la herencia no genética implica la transmisión de factores que a menudo responden a las condiciones del medio.

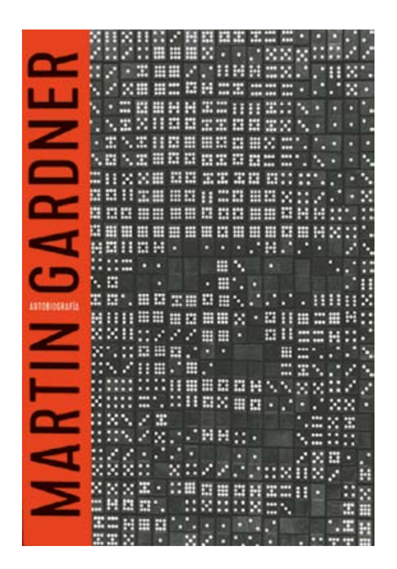
En muchos casos, la transmisión de caracteres de padres a hijos por vía distinta de los genes desempeña incluso un papel adaptativo, similar al de la plasticidad génica, de ahí su denominación de «efec-

tos parentales adaptativos». Los propios factores ambientales pueden dotar a los individuos de una propensión a transmitir rasgos que ellos mismos no expresan. Por ejemplo, fumar es peligroso para la madre y para el hijo que lleva en su seno, pero los efectos que provoca difieren: en la mujer fumadora se desarrollan una serie de afecciones respiratorias, circulatorias, etcétera, en tanto que los embriones expuestos a la nicotina *in utero* pueden sufrir la reprogramación de determinados genes, con la consiguiente pérdida de peso al nacer y mayor riesgo de trastornos de la conducta. Unos efectos que pocos dudarían en alinear con las mutaciones génicas de la línea germinal.

Sin embargo, los factores no genéticos difieren de los genéticos en que son menos estables, más mudables, en el transcurso de las generaciones. Por botón de muestra, en muchos mamíferos, los gustos adquiridos de un tipo particular de alimento pueden transmitirse de madre a hijo, ya sea por aprendizaje, ya sea por vía fetal (exposición a sustancias derivadas del alimento que pasan de la sangre materna a la fetal a través de la placenta). Sin embargo, la transmisión se ciñe probablemente a una sola generación.

Algunos restringen la herencia no genética a la epigenética, pero esta no es más que la punta del iceberg. En los últimos años, el término *epigenética* ha derivado hacia un significado algo distinto del que le concedió en los años cuarenta Conrad Waddington: la interacción entre genes y entorno que daba lugar al fenotipo. Ahora designa los efectos de determinados tipos de moléculas, en particular, grupos metilo, histonas y ARN, que interactúan con el ADN y condicionan el momento, el lugar y el modo en que deben expresarse los genes [*véase* «Epigenética: La herencia más allá de los genes», colección Temas de IyC n.º 81, 2015]. La herencia no genética incluye efectos parentales adaptativos, el aprendizaje social en los animales, el microbioma heredado y la herencia estructural de eucariotas unicelulares. Estos factores desempeñan funciones importantes, incluida la predicción de respuestas adaptativas, el descubrimiento de picos de eficacia biológica y la predicción de cambios genéticos.

—Luis Alonso



PURO ABRACADABRA
Martin Gardner
Páginas Libros de Magia, 2018

La autobiografía del maestro Martin

Luces y sombras en la última obra de uno de los mejores divulgadores de la historia

Puro abracadabra, editada por Páginas Libros de Magia, es la traducción al castellano de la autobiografía del que para mí —y para muchísima gente— ha sido el mejor divulgador de las matemáticas de todos los tiempos: el inimitable Martin Gardner. Fue la última obra del genio de la claridad, escrita con una máquina de escribir eléctrica cuando contaba 95 años de edad.

Esperaba con entusiasmo la traducción, pero, lamentablemente, me ha decepcionado. La vida de Gardner fue plácida y sin grandes sobresaltos, nada emocionante. Comparada, por ejemplo, con la del físico Richard Feynman (1918-1988), la vida de este «escriba filósofo» resulta anodina desde cualquier punto de vista que no sea el intelectual.

La autobiografía, que arranca desde su infancia en Oklahoma, se va convirtiendo en una lista de familiares y conocidos sin interés para el lector. Punto del que nos advierte el propio Gardner en el prólogo, al referirse a la obra como «lo que sigue es una divagación autobiográfica». Es cierto que es un lujo que el propio Martin nos cuente sus inicios y evolución como ensayista. Cómo, después de trabajar durante un par de años en calidad de reportero para *The Tulsa Tribune* y servir en el Ejército durante la Segunda Guerra Mundial, comenzó a hacerse un nombre en la revista *Esquire* con cuentos de ciencia ficción (uno de ellos fue *The no-sided professor*, un relato en el que un matemático crea una variante de la cinta de Möbius, cuya construcción culmina con la desaparición de la propia cinta; conocimiento que emplea para hacer desaparecer a otro matemático rival). Y cómo, en 1956, comenzó a escribir para *Scientific American*. Gardner mandó un texto sobre cómo construir flexágonos plegando papel. El artículo tuvo un éxito inusitado entre el público, de modo que el editor le preguntó si podría escribir una columna semejante cada mes. Su respuesta afirmativa acabaría convirtiéndose en la mítica columna *Mathematical Games,* «Juegos matemáticos», que estuvo a su cargo más de 25 años [*véase* «El universo matemágico de Martin Gardner», colección Temas de IyC n.º 77, 2014; *y* «Cien años con Martin Gardner», por Colm Mulcahy y Dana Richards, Investigación y Ciencia, octubre de 2014]. Sin duda, esos textos han generado más vocaciones matemáticas que ninguna otra obra en la historia.

Gardner mantuvo relación con gente de la talla de Isaac Asimov, Salvador Dalí o Vladimir Nabokov, por citar solo tres de los más de 500 personajes que aparecen en esta obra de 300 páginas. Gardner desea citar a tanta gente para que nadie quede fuera que, cuando nos describe estos encuentros, resultan insustanciales y atropellados. Incluso el proverbial sentido del humor del que hacía gala en sus textos aparece aquí trasnochado; la gran cantidad de historias «divertidas» que Gardner relata parecen bromas entre caballeros del siglo xix.

Con todo, el libro también se convierte en lo que cualquier admirador de Gardner esperaría cuando escribe sobre matemáticas, magia o pseudociencia, aunque se

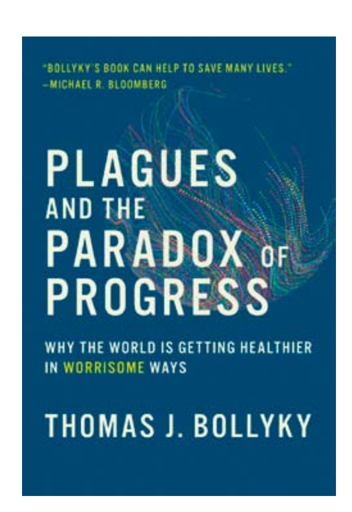
trata de una pequeña parte del contenido. Aun así, nos encontrarnos con perlas donde reconocemos a Gardner en estado puro: «¿Por qué está el universo matemáticamente estructurado? ¿Por qué, como hace poco ha expresado Stephen Hawking, se ha molestado en existir? ¿Por qué hay algo en lugar de nada? Tal vez en Andrómeda haya formas de vida que sepan las respuestas. Yo, desde luego, no. Y usted tampoco». O: «Más influyó Newton en cambiar el mundo que cualquier rey, o reina, o gran jefe militar. Einstein, sentado y pensando en soledad, ha cambiado el mundo más que ningún político».

Gardner fue capaz de combinar la fe de su madre, «una metodista devota», con el escepticismo de su padre, un aficionado a la ciencia que le construyó a su hijo un laboratorio junto a la cocina hasta convertirse en «un misteriano». En la parte final del libro nos explica que cree en Dios, aunque es consciente de que «no solamente no existe prueba alguna de la existencia de Dios o de otra vida, sino que todos los datos disponibles apuntan vigorosamente a negarlo». El inolvidable Carl Sagan (1934-1996), poco antes de morir a causa de un cáncer, le preguntó a Gardner si creía en Dios simplemente porque eso le hacía más feliz. La respuesta de Gardner fue: «Mi fe descansa enteramente en mi deseo. Pero la felicidad que aporta no es como el momentáneo bienestar que produce un segundo martini. Es un escape duradero de la desesperación que sigue a la percepción hiriente de que uno mismo, y todos los demás, no tardaremos en desaparecer sin remedio del universo».

Gardner posee una extensa obra de más de un centenar de libros de divulgación científica, filosofía, matemática recreativa, poesía y ficción que han inspirado a varias generaciones. Si tuviera que escoger un solo divulgador científico de los muchos que me han impactado, elegiría sin duda a Martin Gardner. He disfrutado todas y cada una de las obras suyas que han caído en mis manos. Esta última ha resultado la más floja y desaliñada. Sin embargo, la recomiendo sin paliativos. La editorial Páginas Libros de Magia, gracias a la profesionalidad del editor, Juan Francisco Bonilla y, sin duda, a la admiración que siente por el autor, ha conseguido que el libro sea indispensable para cualquier seguidor de Gardner de habla española. El diseño es exquisito. La portada (el rostro de Martin construido con fichas de dominó) es obra de Ken Knowlton, uno de los pioneros de los gráficos por ordenador.

Esta edición española, que mantiene la introducción del singular matemago Persi Diaconis y el epílogo del mago escéptico James Randi, añade un bonus: un prólogo de nuestro matemago español, Fernando Blasco. Bonilla ha trufado la obra de notas aclaratorias y extensas informaciones que en ningún momento entorpecen la lectura, un índice onomástico de más de medio millar de personajes, y un índice de libros, revistas y periódicos que es un tesoro para quienes adoramos a Martin Gardner.

—Bartolo Luque
Universidad Politécnica de Madrid
Autor de la sección «Juegos matemáticos» de IyC desde 2013



PLAGUES AND THE PARADOX OF PROGRESS
WHY THE WORLD IS GETTING HEALTHIER IN WORRISOME WAYS
Thomas J. Bollyky
MIT Press, 2018

Las paradojas de un mundo más sano

En los países en desarrollo, la lucha contra las enfermedades infecciosas no se ha visto acompañada de otros avances económicos, políticos o sociales

Thomas Bollyky es profesor de derecho en la Universidad de Georgetown y director del Programa de Salud Global del Consejo de Relaciones Exteriores, un laboratorio de ideas estadounidense. El subtítulo de este libro, «Por qué el mundo está cada vez más sano de un modo preocupante», resume su teoría central: el descenso de las enfermedades infecciosas (transmisibles) en los países de renta media, y especialmente en los de renta baja, aun con todas las consecuencias positivas para la salud que ha comportado, no se ha seguido de las mejoras en el nivel de ingresos o renta per cápita, oportunidades de trabajo o cambios en la gobernanza similares a los que sí experimentaron los países de renta alta hace varias décadas. Por ello, el autor formula la paradoja siguiente: el mundo está cada vez más sano, pero de un modo que quizá debería preocuparnos.

El libro es una combinación de ciencia, historia y relaciones internacionales dirigida a una audiencia amplia. Quizá por ello resulta un tanto inconexo y un punto disperso con respecto a su narrativa. Bollyky trata de argumentar su teoría a partir del descenso de enfermedades infecciosas que tuvo lugar primero en los países de renta alta, luego en los de renta media y, finalmente —aunque no en la misma proporción—, en los de renta baja, sobre todo en África y Asia.

Las consecuencias positivas de este control —y, en algunos casos, eliminación— de las enfermedades infecciosas son conocidas. La esperanza de vida aumenta de manera significativa dada la reducción en la mortalidad infantil asociada a este tipo de trastornos. A partir de esta realidad, la epidemiología de las causas de enfermedad y discapacidad cambia, y se registra un aumento en las enfermedades no transmisibles, como el cáncer, las enfermedades del corazón, las vasculares cerebrales, las pulmonares crónicas, la hipertensión o la diabetes. Hay que valorar también el impacto que supone el desplazamiento de la población desde las zonas rurales a las urbanas, a las denominadas megaurbes que, en muchos casos, no disponen de un buen sistema sanitario, de condiciones adecuadas de habitabilidad ni de oportunidades de trabajo para una buena parte de sus habitantes.

El libro comienza describiendo la historia de la relación de las enfermedades infecciosas con los seres humanos y con las sociedades que fueron desarrollando la agricultura, el comercio y la urbanización. Este primer capítulo es el más académico del libro, basado en múltiples trabajos clásicos que el autor utiliza como referencia. También introduce conceptos de demografía y filosofía que, de forma directa o indirecta, influyeron en las mejoras sanitarias, como el empleo de agua potable y un sistema conveniente de alcantarillado.

Tras ello, el autor pasa a describir la evolución de dos enfermedades infecciosas de gran trascendencia: la viruela y el paludismo. La idea central se basa en las relaciones que existieron entre estas infecciones, la ayuda internacional y los Estados, así como en la influencia de las campañas de erradicación global iniciadas a mediados del siglo xx. Bollyky analiza los resultados específicos alcanzados en países de renta baja, y señala que estos no se han visto acompañados de los cambios en gobernanza, sistemas sanitarios y mejoras sociales que acontecieron en las naciones de renta alta. El resultado global es un aumento significativo de las enfermedades no transmisibles, que, en estos países, se dan en edades más tempranas y se asocian a una mayor mortalidad y discapacidad. Y lo que resulta más preocupante: lo hacen a un ritmo creciente y acelerado, hecho que supone además una sobrecarga importante para sus habitualmente débiles y frágiles sistemas sanitarios, especialmente en lo que respecta al número de personal sanitario, muy escaso.

La obra se ocupa también de las enfermedades infecciosas más propias de

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



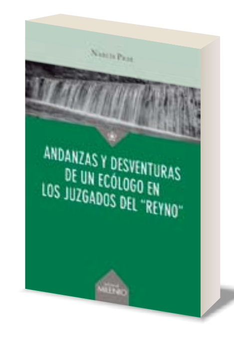
ÉTICA PARA MÁQUINAS
José Ignacio Latorre
Ariel, 2019
ISBN: 978-84-344-2965-9
320 págs. (18,90 €)



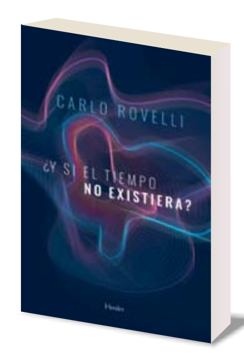
EDITANDO GENES: RECORTA, PEGA Y COLOREA
LAS MARAVILLOSAS HERRAMIENTAS CRISPR
Lluís Montoliu
Prólogo de Francisco J. Martínez Mojica
Next Door, 2019
ISBN: 978-84-949245-1-4
436 págs. (24,70 €)



ANDANZAS Y DESVENTURAS DE UN ECÓLOGO EN LOS JUZGADOS DEL «REYNO»
Narcís Prat
Milenio, 2019
ISBN: 978-84-9743-847-6
128 págs. (15 €)



¿Y SI EL TIEMPO NO EXISTIERA?
Carlo Rovelli
Herder, 2019
ISBN: 9788425440571
200 págs. (13,80 €)





LA NUEVA BIOLOGÍA DE LA MENTE
QUÉ NOS DICEN LOS TRASTORNOS CEREBRALES SOBRE NOSOTROS MISMOS
Eric R. Kandel
Paidós, 2019
ISBN: 978-84-493-3565-5
304 págs. (24 €)



EL INCREÍBLE VIAJE DE LAS PLANTAS
Stefano Mancuso
Galaxia Gutenberg, 2019
ISBN: 9788417747312
144 págs. (16,90 €)

la infancia, como el sarampión. El autor establece la relación entre estas enfermedades y la economía, empleando el ejemplo de las campañas de vacunación internacionales que han logrado reducir notablemente la mortalidad infantil y transformar la economía de estos países en unas pocas décadas. Para ello se basa en dos naciones concretas: China y Kenia. Bollyky plantea de nuevo la pregunta clásica: ¿una sociedad más sana es más rica o próspera? Algunos datos permiten aproximar la respuesta. Las mejoras en la esperanza de vida registradas en el África subsahariana entre 2000 y 2011 contribuyeron a una ganancia del 24 por ciento en todos los ingresos de estos países. La existencia de una cobertura sanitaria universal se considera clave para erradicar la pobreza extrema. Sin embargo, otros autores han demostrado también, por ejemplo, que la renta per cápita disminuye ligeramente conforme aumenta la esperanza de vida en estos países.

Bollyky analiza asimismo las enfermedades infecciosas asociadas al establecimiento de las sociedades urbanas modernas, empleando para ello los ejemplos del cólera y la tuberculosis. El apartado dedicado a la descripción de la vida cotidiana en ciudades como Nueva York en el siglo XIX resulta especialmente interesante y llamativo, y permite comprender bien la irrupción y el mantenimiento de ambas enfermedades en la ciudad. El autor hace particular énfasis en los riesgos asociados a las megaurbes que ya existen o que están apareciendo en todo el planeta, especialmente en países de renta baja, centrándose en el estudio de Daca, en Bangladesh.

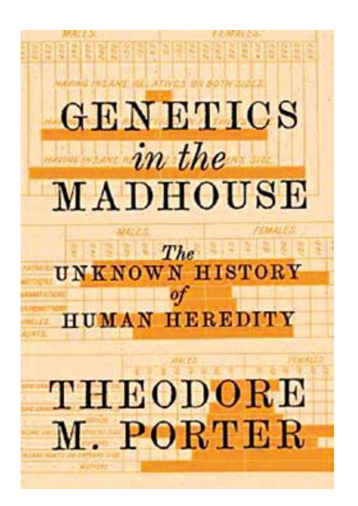
El libro se adentra también en las infecciones relacionadas con áreas geográficas concretas, generalmente muy pobres y con problemas ecológicos importantes. Analiza el denominado «cinturón de la meningitis» en África, focalizándose el ejemplo de Níger. Es interesante el dato del número de adultos jóvenes que, tras sobrevivir a estas enfermedades, emigran de las zonas endémicas.

Por último, el capítulo final resulta un tanto curioso. El autor parte de una de las citas más famosas —y erróneamente atribuidas— de la medicina, la de William H. Stewart sobre la derrota de las enfermedades infecciosas: «Ha llegado el momento de cerrar el libro de las enfermedades infecciosas. Básicamente, hemos eliminado las infecciones en los Estados Unidos de América». Bollyky, en un ejercicio de razonamiento y lenguaje quizás un tanto complejo y difícil de seguir, intenta adaptar esta cita a un marco de referencia útil para realizar finalmente recomendaciones sobre cómo conseguir que el mundo siga siendo un lugar más sano y mejor para vivir, pero a la vez hacerlo de un modo menos preocupante.

Así pues, el libro trata de argumentar que el mundo se ha hecho mejor, pero que ello debería preocuparnos. Ha habido reducciones muy significativas de las enfermedades infecciosas y de la mortalidad infantil en los países pobres, pero no se han producido otros cambios económicos, sociales y políticos que, en el pasado, acompañaron a la reducción de las infecciones en las naciones más ricas. El rápido crecimiento de la población, la urbanización sin precedentes y el aumento en el porcentaje de adultos jóvenes están llevando al límite la capacidad de los Gobiernos y los ecosistemas en los países de renta baja. Y, entre otras consecuencias, fuerzan la emigración y la inestabilidad social y política, al tiempo que elevan el riesgo de determinadas epidemias y, especialmente, el de enfermedades no transmisibles.

El mensaje final del libro es que todos deberíamos preocuparnos. Pero, sobre todo, que deberíamos actuar a todos los niveles para ayudar a los países de renta baja a afrontar el paradójico progreso que ahora experimentan gracias al esfuerzo continuado y al éxito en el control de las enfermedades infecciosas. La inversión necesaria para conseguir mejor educación, mejor sanidad y mejores condiciones de trabajo y habitabilidad en estos lugares son tres objetivos que deberíamos afrontar decididamente. Tenemos un solo mundo, en el que hay una sola salud.

—Antoni Trilla
Hospital Clínic de Barcelona
Catedrático de salud pública de la Universidad de Barcelona
Investigador de ISGlobal



GENETICS IN THE MADHOUSE
THE UNKNOWN HISTORY OF HUMAN HEREDITY
Theodore M. Porter
Princeton University Press, 2018

Los orígenes olvidados de la genética

El desconocido papel precursor de las casas de salud mental

En el nacimiento de la genética convergieron muchos factores cuyo conocimiento no discurre paralelo a su importancia. Theodore M. Porter, titular de la cátedra Peter Reill en la Universidad de California en Los Ángeles y autoridad en el pasado de la genética cuantitativa, con libros sobre Karl Pearson y el pensamiento estadístico, saca ahora a la luz el papel clave desempeñado por los datos hereditarios recogidos en frenopáticos, orfanatos y centros de reclusión.

El estudio de la herencia no emergió como ciencia ligada a la estadística, sino como un esfuerzo internacional para recoger datos de asociaciones que arrojaran luz sobre la enfermedad mental. Los archivos de levas del Ejército, los registros de cárceles, los libros de las oficinas de inmigración, censos, casas de seguros y otras instituciones incluían información que hoy nos resulta valiosísima. En 1830, la investigación sobre la herencia estaba ya saturada de números. Pese a ello, muy pocos conocen la obra del francés Jean-Étienne Esquirol o del británico John Thurnam.

Entre 1789 y 1900, el número de enfermos psiquiátricos o «débiles mentales» creció de forma explosiva en la Europa y América del Norte industrializadas. Entre los contemporáneos, unos achacaban el fenómeno al establecimiento de una atención médica y legal más rigurosa y a un diagnóstico más preciso. Para otros, en cambio, la culpa la tenía la mecanización fabril. En cualquier caso, la cifra de enfermos se multiplicaba y la Administración pública exigía pruebas de la eficacia de los tratamientos hospitalarios para justificar el gasto incrementado. El historial familiar y la historia clínica se recogían en cuadernos de incidencias, que se completaban con observaciones y con detallados árboles genealógicos que situaban las relaciones familiares en el marco del diagnóstico hospitalario. Había formularios estandarizados que permitían crear pautas de correlaciones entre el historial familiar y tipos específicos de enfermedades, para, al final, confeccionar censos nacionales de taras hereditarias.

Figuras clave de los inicios de la eugenesia, como Francis Galton, Karl Pearson y Charles Davenport, fueron herederos de una larga tradición médico-estadística. Pearson combinaba estadística, eugenesia y método científico. En su revista *Biometrika* encontramos, junto a trabajos de médicos y psicólogos, artículos de funcionarios de prisiones. La experiencia de Pearson fue retomada unos años más tarde por Davenport en la Oficina de Registro Eugenésico de Cold Spring Harbor, en Nueva York. En oposición a Pearson, Davenport sostenía que los experimentos de Mendel sobre híbridos vegetales lo habían cambiado todo. De 1908 en adelante creó una vasta empresa para identificar factores mendelianos en los defectos humanos más incapacitantes y costosos para el erario público, y elaboró árboles familiares para poner de manifiesto las proporciones mendelianas de la mayoría de las condiciones mentales. Su trabajo fue muy bien acogido en Europa y Estados Unidos, pero no le faltaron las críticas de Pearson y sus seguidores en los años treinta, cuando los genetistas iban a incoar una nueva era al aunar genética y evolución.

¿Quién fundó la genética? A tenor de la historia oficial, el reparto de méritos no puede olvidar los de William Bateson y Wilhelm Johannsen, quienes acuñaron los términos *genética* y *gen*, respectivamente, al alborear el siglo xx. En 1910, Thomas Hunt Morgan demostró la eficacia de las leyes de la genética en moscas del vinagre. Aunque la gloria debida sea para Gregor Mendel, quien mediado el siglo xix cruzó razas de guisantes para descubrir las bases de la herencia. Con todo, no fueron ellos los pioneros. Hubo una fuente originaria más oscura: el estudio estadístico de la herencia en los «hospitales de inocentes» de las postrimerías del siglo xviii y primera mitad del siglo xix de Europa y América del Norte. En esos centros se empezaron a recopilar datos que se sistematizaban en tablas y gráficos, lo que permitió el alumbramiento de la concepción de la enfermedad mental como rasgo hereditario.

La genética tiene una fuente oscura: el estudio de la herencia en los «hospitales de inocentes»

Cien años antes de introducirse cualquier concepto asociado al gen, los médicos de hospitales psiquiátricos comenzaron a crear catálogos de causas de enfermedades en el registro de admisiones, donde apuntaban, desde el mismo comienzo, el carácter hereditario de aquellos extraños trastornos. Pronto se percataron médicos y responsables de la Administración del Estado de la nula capacidad de curar o frenar el crecimiento de población afectada. Ante ello, la atención pasó a centrarse en cómo revertir la tasa reproductora de los enfermos, empezando por identificar a las familias portadoras de tales taras y obviar la generación de tales vástagos del matrimonio.

Genetics in the madhouse es una historia desconocida de la recogida y distribución de datos en los frenopáticos, escuelas para niños con discapacidades y prisiones que sembraron la semilla de la nueva ciencia de la herencia humana. Para ello, el autor ha vaciado los archivos de esas instituciones de Europa y América del Norte, lo que supone adentrarse en árboles genealógicos familiares, censos de enfermedades mentales, recuentos médico-sociales y prácticas cuantitativas innovadoras que se realizaron en los frenopáticos mucho antes de que pudiéramos manipular el ADN en el laboratorio. En los hospitales psiquiátricos se avanzaron muchos de los planteamientos y métodos de lo que más tarde se llamaría eugenesia.

Porter escalona temporalmente su exposición. En una primera fase se produce la entrada de registros sistemática de ingresos hospitalarios, con explicaciones ingenuas sobre las posibles causas de la enfermedad. Se prestó especial cuidado en refinar y normalizar las tablas. En un segundo momento, en torno al ecuador del siglo xix, se idearon criterios para uniformizar la entrada de datos, con su clímax en las tablas de correlaciones entre relación de parentesco y forma de enfermedad, en un esfuerzo por sacar a la luz relaciones causales. Por último, desde el decenio de 1890 hasta el de 1930, el estudio de las relaciones familiares allanó el camino para abordar las poblaciones y, en particular, la eugenesia.

El estudio del genotipo y el fenotipo se vio beneficiado con técnicas estadísticas como tablas de correlación o análisis de regresión. Se entabló un agrio debate entre biometristas y mendelianos sobre la mejor forma de estudiar la herencia biológica. La nueva genética resaltaba la microscopía, la mejora vegetal y animal y los organismos modelo. Pese al intenso compromiso de los genetistas con la eugenesia y la medicina, *Homo sapiens* no era el organismo preferido. Era renuente a la manipulación en el laboratorio y su generación en el tiempo se prolongaba mucho en comparación con las moscas del vinagre, nematodos y virus. Hasta tiempos recientes, casi siempre los historiadores de la genética se hacían eco de los científicos de laboratorio y los mejoradores, al centrarse en los genes y luego en el ADN.

Inevitablemente, los métodos de estudio cambiaron con el transcurso del tiempo. Las primitivas tablas de correlación manuscritas y los mapas de familia cedieron paso a herramientas estadísticas más elaboradas, a la teoría genética y a los estudios actuales de asociación de genes. Tras la Segunda Guerra Mundial, los genetistas tomaron distancia de la ciencia asistencial frenopática y de la eugenesia. La influencia del sistema queda parcialmente velada por su crueldad y abandono. Y era fácil pasar por alto la red asistencial, pues era deficiente y descentralizada.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

ABRIL

1969

Elementos transuránicos

«Hasta 1963, el ritmo de descubrimiento de elementos transuránicos fue alto. Cada paso adelante requería un equipo y unos métodos cada vez más complejos para aumentar el número de neutrones en el núcleo, mientras que a la par disminuía la estabilidad de los núcleos producidos, lo que dificultaba su observación e identificación. Sin embargo, el tema de los elementos pesados sintéticos suscita un interés más vivo que nunca a causa de los avances en la teoría de la estabilidad nuclear, que ha abierto la posibilidad de sintetizar elementos que rebasan muy largamente lo soñado por los primeros que se adentraron en este campo. Al mismo tiempo, se ha avanzado mucho en la producción en grandes cantidades de elementos inestables a través del elemento 98, en el conocimiento de sus propiedades y en el descubrimiento de sus aplicaciones aprovechables. —Glenn T. Seaborg y Justin L. Bloom»

Seaborg compartió el premio Nobel de química de 1951 por su labor en este campo.

Talladores de piedras

«Suele creerse que los únicos hombres vivos que manufacturan herramientas labrando el pedernal se reducen a unos pocos miembros de alguna tribu que conserva los usos de sus antepasados y a un puñado de artesanos especializados en la fabricación de piedras para las armas de chispa supervivientes. Durante unos recientes trabajos arqueológicos en Turquía, Jacques Bordazz, de la Universidad de Montreal, descubrió que esa creencia es errónea: los talladores de pedernal del pueblo turco de Çakmak producen al año 500 toneladas de cuchillas de pedernal, suficientes para abastecer de bordes cortantes a todos los trillos de la Turquía rural. Los cultivadores de trigo turcos separan el grano de la paja valiéndose del trillo, una especie de trineo que arrastran sobre las gavillas esparcidas sobre la era. Cada trillo tiene entre 600 y 800 cuchillas de pedernal, de poco menos de cinco centímetros de largo, insertas de canto en ranuras. Cada tallador puede producir al día unos 230 kilogramos de cuchillas obtenidas de nódulos de pedernal extraídos de canteras locales.»

La nueva maquinaria agrícola hizo que esta artesanía quedase obsoleta en los años ochenta



1969



1919



1869

1919

Viajes en dirigible

«La sustitución del hidrógeno por el helio, una de las contribuciones estadounidenses a la aviación militar, elimina uno de los mayores prejuicios que existen contra los aparatos más ligeros que el aire. Por ahora el gas helio, que no es inflamable, se emplea en lugar del explosivo hidrógeno, con lo que ya no hay que preocuparse de incendios ni en vuelo ni en tierra. Los motores pueden situarse donde se quiera, así como la cocina y los fogones y la planta de calefacción, pues el dirigible ha dejado de ser una enorme carga explosiva encerrada en una bolsa de seda, lista para estallar en llamas ante la menor chispa. Francamente, el avión como propuesta comercial no ocupa hoy sino un modesto segundo puesto tras el dirigible. Este último está destinado al transporte de pasajeros y mercancías en las grandes rutas, en competencia con los vapores intercontinentales.»



1919: Los elegantes dirigibles son la esperanza de los viajes por aire venideros. Los pasajeros de uno que atraviesa el Atlántico se relajan en el salón panorámico de popa.

1869

Carne refrigerada

«Un nuevo invento, bajo la forma de máquina de hacer hielo y de refrigeración, fue ensayado a bordo del buque *William Taber*, situado en el río Este de la ciudad de Nueva York, en presencia de un grupo de científicos e ingenieros mecánicos a quienes se habían cursado invitaciones. La embarcación ha sido equipada con esa nueva máquina para conservar carne de res fresca y otros alimentos perecederos durante períodos largos, y zarpará rumbo a Texas un día de la semana próxima. Los dos grandes principios en que se basa el proyecto parecen ser, primero, el uso de bombas para licuar el gas carbónico [dióxido de carbono]; y segundo, su reconversión a gas repetidamente y sin parar.»

El barco no logró cumplir la entrega. Suele citarse 1877 como fecha del primer viaje con éxito de un buque refrigerador.

Alta costura y juguetes

«El que trata de juguetes no es el menos interesante de los informes ingleses sobre la Exposición Francesa. El principal juguete francés es una muñeca, pero no la reproducción de un bebé para que lo acaricie una niña, sino la de una dama ataviada a la moda, con un destacado fabricante que le cambia el traje cada mes para asegurar la fidelidad. Como excusa de esta prematura inculcación a la infancia del gusto por la ropa elegante, se aclara que esas muñecas sirven de modelos para sombrereros de las colonias y otros de fuera de París, antes de ser regaladas a sus hijas. Las muñecas francesas, a diferencia de las originales nuestras de cara de cera, tienen la cabeza de porcelana.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXX, N.º 16, 19 DE ABRIL DE 1919

ASTROFÍSICA

La vida interior de las estrellas de neutrones

Clara Moskowitz

Las estructuras más densas del universo constituyen un persistente misterio que solo ahora se está empezando a descifrar.

MEDICINA

Acabar con el silencio

Dina Fine Maron

Tras algunos intentos fallidos, la terapia génica permite avanzar en el tratamiento de la sordera.

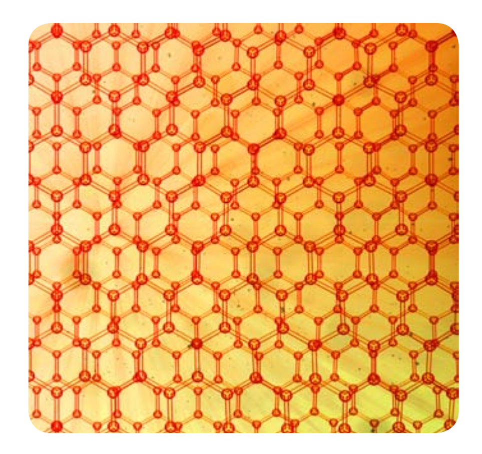


MATERIALES

Superconductividad en el grafeno

Elizabeth Gibney

Los investigadores intentan entender el inesperado comportamiento de este material bidimensional.



FÍSICA

¿Es el universo un autómata celular?

Manon Bischoff

Entrevista con Gerard 't Hooft, premio nóbel de física en 1999, sobre su interpretación de la mecánica cuántica y otras cuestiones clave para la física de partículas.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

Difusión controlada

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Andrés Martínez: *Apuntes*; Javier Grande: *Apuntes*; Lorenzo Gallego Borghini: *De las rocas a las biomoléculas*; Anna Romero: *Las aves perciben los colores en categorías*; Bartolo Luque: *Cuando las plantas hacen matemáticas*; Gonzalo Claros: *Valor facial y El reloj intracelular*; Xavier Roqué: *La prehistoria de la tabla periódica*; Fabio Teixidó: *El exoplaneta vecino*; Tomás Ortín Miguel: *El código oculto de las partículas*; Ignacio Navascués: *Los telómeros no son bolas de cristal*; Ramón Muñoz Tapia: *El efecto Faraday*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España